



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - RG 141536

PEMODELAN 3 DIMENSI CANDI WRINGINLAWANG MENGUNAKAN METODE *STRUCTURE FROM MOTION* UNTUK DOKUMENTASI CAGAR BUDAYA

SELF NAUFATUNNISA
NRP 3513 100 049

Dosen Pembimbing
Agung Budi Cahyono, ST, MSc, DEA

DEPARTEMEN TEKNIK GEOMATIKA
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

TUGAS AKHIR - RG 141536

PEMODELAN 3 DIMENSI CANDI WRINGINLAWANG MENGUNAKAN METODE *STRUCTURE FROM MOTION* UNTUK DOKUMENTASI CAGAR BUDAYA

SELF NAUFATUNNISA
NRP 3513 100 049

Pembimbing
Agung Budi Cahyono, ST, MSc, DEA

DEPARTEMEN TEKNIK GEOMATIKA
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



FINAL ASSIGNMENT - RG 141536

3D MODELLING OF WRINGINLAWANG TEMPLE USING STRUCTURE FROM MOTION METHOD FOR DOCUMENTATION CULTURE HERITAGE

SELF NAUFATUNNISA
NRP 3513 100 049

Supervisor
Agung Budi Cahyono, ST, MSc, DEA

DEPARTEMENT OF GEOMATICS ENGINEERING
Faculty of Civil Engineering and Planning
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PEMODELAN 3 DIMENSI CANDI WRINGINLAWANG MENGUNAKAN METODE STRUCTURE FROM MOTION UNTUK DOKUMENTASI CAGAR BUDAYA

Nama Mahasiswa : Selfi Naufatunnisa
NRP : 3513 100 049
Departemen : Teknik Geomatika FTSP-ITS
Dosen Pembimbing : Agung Budi Cahyono, ST, MSc, DEA

Abstrak

Candi Wringinlawang merupakan salah satu cagar budaya peninggalan kerajaan Majapahit yang bertempat di Kabupaten Mojokerto, Jawa Timur. Dengan riwayat pemugaran terakhir pada tahun 1991/1992 s.d. 1994/1995, perlu dilakukan pendokumentasian sesuai dengan UU no 11 tahun 2010 tentang Cagar Budaya.

Seiring berkembangnya teknologi, penelitian untuk mendapatkan bentuk 3D banyak dilakukan seperti pengaplikasian Structure from Motion (SfM) dalam pendokumentasian cagar budaya. Karena untuk keperluan dokumentasi, diperlukan model 3D yang sudah bergeoreference dengan akurasi kurang dari 0.5 m sesuai dengan syarat bangunan dengan LoD 3.

Penggunaan kamera non metrik Sony Exmor 12.4 M yang dibantu dengan wahana DJI Phantom 3 dalam pengambilan foto candi menghasilkan 155 buah foto, 465,487 titik sparse cloud, 5,996,415 titik dense cloud, 1,155,740 faces, dan 580.147 vertices. Setelah dilakukan analisa menggunakan titik ICP lapangan, didapatkan besar $RMSE_x=0.042$ m, $RMSE_y=0.047$ m, $RMSE_z=0.048$ m. Dari segi akurasi, besar nilai RMSE koordinat model Candi yang dihasilkan termasuk dalam LoD orde 3 yakni masih masuk batas toleransi sebesar 0.5 m. Dari segi visual, struktur yang terbentuk menyerupai objek sesungguhnya dengan penampakan eksterior bangunan Candi Wringinlawang.

Kata kunci: Candi Wringinlawang, *Structure From Motion (SfM)*, *model 3D*, *warisan budaya Kerajaan Majapahit*

3D MODELLING OF WRINGINLAWANG TEMPLE USING STRUCTURE FROM MOTION METHOD FOR DOCUMENTATION CULTURE HERITAGE

Name : Selfi Naufatunnisa
NRP : 3513 100 049
Department : Geomatics Engineering FTSP-ITS
Supervisor : Agung Budi Cahyono, ST, MSc, DEA

Abstract

Wringinlawang Temple was one of the Majapahit Kingdom's cultural heritage. It was located at Kabupaten Mojokerto, East Java. It had been restored in 1991/1992 until 1994/1995. The documentation of Wringinlawang was needed according to UU no 11 tahun 2010 tentang Cagar Budaya.

In this era, many research in computer vision was increased. The one of Computer vision algorithm was Structure from Motion. Structure From Motion method was used for documentation the cultural heritage for several temples in Indonesia like Singosari Temple, Brahu Temple, etc.

By using non metric camera, Sony Exmor 12.4 M, on DJI Phantom 3, was captured 155 photos. It built 3d modelling of Wringinlawang Temple with 465,487 sparse cloud, 5,996,415 dense cloud, 1,155,740 faces, and 580,147 vertices. The 3d model of Wringinlawang temple was analyzed by Independent Check Point (ICP) from measured in the field. The analyzed of ICP gave the result that $RMSE_x=0.042m$, $RMSE_y=0.047m$, $RMSE_z=0.048m$. The purpose of this research was 3D model on LoD3. Because of that, the accuration of the model must lower than 0.5 m. The Accuration of 3d model known by Root Mean Square (RMSE). Beside the accuration, LoD 3 had visualization of the exterior object like the real object. The result of this research was on LoD3 because RMSE value lower than 0.5 m and visualized the exterior of Wringinlawang temple.

Keywords : Wringinlawang Temple, *Structure From Motion (SfM)*, *3D modelling*, *the cultural heritage of Majapahit Kingdom*

LEMBAR PENGESAHAN

PEMODELAN 3 DIMENSI CANDI WRINGINLAWANG MENGGUNAKAN METODE *STRUCTURE FROM MOTION* UNTUK DOKUMENTASI CAGAR BUDAYA

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Program Studi S-1 Teknik Geomatika
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

SELF NAUFATUNNISA

NRP. 3513100049

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

Agung Budi Cahyono, ST, M. Sc, DEA

NIP. 19690520 199903 1 002



(.....)



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul **“Pemodelan 3 Dimensi Candi Wringinlawang menggunakan Metode Structure From Motion (SfM) untuk Dokumentasi Cagar Budaya”** dengan baik.

Laporan Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan studi dan memperoleh gelar sarjana di Departemen Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyampaikan terimakasih dan penghargaan sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu, mendukung, dan memberikan kontribusi hingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan kepada :

1. Orang tua dan segenap keluarga penulis yang selalu memberikan doa dan dukungan baik moril dan materil.
2. Bapak Agung Budi Cahyono, S.T., M.Sc., DEA dan Bapak Husnul Hidayat, S.T., M.T. yang membimbing penulis dalam pengerjaan tugas akhir.
3. Bapak Nur Cahyadi, S.T, M.Sc., Ph.D. selaku Ketua Departemen Teknik Geomatika ITS.
4. Bapak Yanto Budi Susanto, S.T., M..Eng. selaku Koordinator tugas akhir.
5. Badan Pelestarian Cagar Budaya (BPCB) Jawa Timur yang mengizinkan untuk mengambil data di Candi Wringinlawang
6. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen pengajar serta civitas akademik Teknik Geomatika ITS yang turut membantu dalam memudahkan dan melancarkan segala aktivitas di kampus.
7. Seluruh rekan seperjuangan angkatan 2013 (G15) yang telah membantu dan berjuang selama 4 tahun ini.

8. Teman-teman penulis, Rani Fitri, Adillah, Fitria, Royyan, Annisa Mega, Arum Sinda, Annisa Mega, Alifatul Ula, Clarana, Retno, Cristian Febrianto, Ila, Ahmad Zakiah, telah mendukung dan menemani penulis dalam suka duka pengerjaan tugas akhir ini.
9. Teman seperjuangan “Bismillah Bahagia” untuk selalu mendukung dalam suka maupun duka.
10. Rekan *Photogrammetry Visual Image Analysis (PVIA)* atas ilmu, pengalaman dan bantuannya selama pengerjaan tugas akhir ini.
11. Dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa dalam laporan ini masih banyak terdapat kekurangan, oleh karena itu sangat diharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun. Penulis berharap agar laporan Tugas Akhir ini dapat dibaca oleh semua pihak dan dapat memberikan tambahan wawasan serta bermanfaat.

Surabaya, Juli 2017

Selfi Naufatunnisa

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Abstrak	v
Abstract	vii
Lembar Pengesahan.....	Error! Bookmark not defined.
Kata Pengantar	xi
Daftar Isi.....	xiii
Daftar Gambar.....	xv
Daftar Tabel.....	xvii
Daftar Lampiran	xix
Bab I Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Relevansi atau Manfaat Kegiatan Tugas Akhir.....	3
Bab II Tinjauan Pustaka	5
2.1 Candi Wringinlawang.....	5
2.2 <i>Computer Vision</i>	6
2.3 <i>Structure from Motion (SfM)</i>	8
2.4 Kalibrasi Kamera.....	13
2.5 <i>3D Modelling</i>	18
2.6 Spesifikasi Kamera dan Wahana	24
2.7 Penelitian Terdahulu.....	28
Bab III Metodologi.....	31
3.1 Lokasi Penelitian	31
3.2 Data dan Peralatan.....	32
3.3 Metodologi Penelitian	33
Bab IV Hasil dan Pembahasan	39
4.1 Hasil	39
4.2 Analisa.....	51
Bab V Kesimpulan dan Saran	65
5.1 Kesimpulan.....	65

5.2 Saran.....	66
Daftar Pustaka	67
Biodata Penulis.....	93

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Candi Wringinlawang.....	5
Gambar 2. 2 Contoh dari algoritma <i>computer vision</i> :	7
Gambar 2. 3 Posisi pengambilan gambar <i>Structure-from-Motion</i>	9
Gambar 2. 4 SIFT	10
Gambar 2. 5 Tipe Feature	11
Gambar 2. 6 distorsi radial	15
Gambar 2. 7 Gambar kondisi kolinear	17
Gambar 2. 8 Level Of Detail	19
Gambar 2. 9 Level of Detail	20
Gambar 2. 10 <i>DJI Phantom 3</i>	24
Gambar 3. 1 Lokasi Penelitian	31
Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian.....	33
Gambar 3. 3 Diagram Alir Pengolahan Data.....	35
Gambar 4. 1 Peta Persebaran GCP	40
Gambar 4. 2 Persebaran titik kontrol pada candi	41
Gambar 4. 3 Arah distorsi lensa	42
Gambar 4. 4 Persebaran Koordinat ICP	47
Gambar 4. 5 Sampel Pengambilan Foto	48
Gambar 4. 6 Sisi pengambilan Gambar.....	48
Gambar 4. 7 Hasil Alignment Photo	49
Gambar 4. 8 Hasil Build Dense Cloud	49
Gambar 4. 9 Hasil Build Mesh.....	50
Gambar 4. 10 Hasil Texture	50
Gambar 4. 11 Model 3D Candi Wringinlawang	54
Gambar 4. 12 Contoh pemberian marker pada objek.....	55
Gambar 4. 13 Proses Masking.....	56
Gambar 4. 14 Grafik Kesalahan Model 3D	57

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2 1 Persyaratan Akurasi LoD	20
Tabel 2 2 <i>Multipliers for various percent probable errors</i>	22
Tabel 2 2. Spesifikasi kamera Sony EXMOR	25
Tabel 2 3 Spesifikasi Wahana <i>DJI Phantom 3</i>	26
Tabel 2 4 Produk dari Penelitian di Candi Borobudur	29
Tabel 4. 1. Hasil Pengukuran GPS Geodetik	39
Tabel 4. 2 Koordinat Poligon dari Total Station	40
Tabel 4. 3 Tabel Titik Kontrol Pada Candi	41
Tabel 4. 4 Hasil Kalibrasi Kamera	43
Tabel 4. 5 Tabel Koordinat ICP dari lapangan	43
Tabel 4. 6 Koordinat ICP pada model	44
Tabel 4. 7 Kesalahan pada poligon	51
Tabel 4. 8 Tabel analisa kalibrasi kamera	52
Tabel 4. 9 Tabel uji-t hasil kalibrasi (x_0 , y_0 , f)	52
Tabel 4. 10 Tabel Kesalahan Koordinat ICP	56
Tabel 4. 11 Tabel Uji Error Koordinat X	58
Tabel 4. 12 Tabel Uji Error Koordinat Y	59
Tabel 4. 13 Tabel Error Koordinat Z	61
Tabel 4. 14 Tabel Kesalahan titik dalam 3D	63

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1. Tabel Perhitungan Poligon
- Lampiran 2. Tabel Perhitungan Koordinat di Candi
- Lampiran 3. Surat Izin Pemanfaatan Cagar Budaya dari BPCB
- Lampiran 4. Form Ukur GPS
- Lampiran 5. Dokumentasi
- Lampiran 6. Hasil Pengukuran GPS
- Lampiran 7. Spesifikasi *GPS Topcon Hiper-Pro*
- Lampiran 8. Spesifikasi *Total Station Hi-Target ZTS-320*
- Lampiran 9. Peta Kawasan Wisata Candi Wringinlawang
- Lampiran 10. Badan Candi Wringinlawang Tampak dari Utara
- Lampiran 11. Badan Candi Wringinlawang Tampak dari Timur
- Lampiran 12. Badan Candi Wringinlawang Tampak dari Selatan
- Lampiran 13. Badan Candi Wringinlawang Tampak dari Barat

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Candi Wringinlawang merupakan salah satu cagar budaya Indonesia yang berada di Kabupaten Mojokerto, Jawa Timur. Candi Wringinlawang dikenal dengan sebutan Gapura Wringinlawang. Candi ini berbentuk gapura dengan fondasi gapura berbentuk segi empat dengan ukuran 13 x 11.50 m dan tinggi 15.50 m (Perpusnas RI, 2014). Candi Wringinlawang telah dipugar dua kali pada Tahun 1991/1992 s.d. 1994/1995 (Wardani dkk, 2015). Candi ini diduga sebagai pintu masuk menuju bangunan penting di ibukota Majapahit. Sebelum ini penelitian yang sudah dilakukan di Candi Wringinlawang meliputi segi artistik (Wardani dkk, 2015) dan sejarah (Kurniasih, 2015) serta adanya model 3D Candi Wringinlawang menggunakan *software SketchUp* oleh Disura tahun 2014.

Di Indonesia sudah ada beberapa cagar budaya yang sudah didokumentasikan bentuknya dalam model 3D seperti Candi Borobudur di Yogyakarta (Suwardhi dkk, 2015), Candi Singosari di Malang (Hidayat dan Cahyono, 2015), (Putra dan Handayani, 2016) dan Gereja Bledug di Semarang (Bayuaji dkk, 2015). Pada penelitian Candi Borobudur, Suwardhi dkk (2015) menggunakan fixed-wing, hexacopter serta kamera Sony RX100 dan menghasilkan produk seperti model 3D Candi Borobudur, DEM, *orthoimages* dan peta 1:100. Untuk penelitian Candi Singosari, Hidayat (2015) dan Putra (2016) dalam pemrosesan foto menggunakan metode *Structure from Motion (SfM)*. Menurut Putra (2016), model 3D yang dihasilkan dari pemrosesan foto dengan SfM tidak

memiliki perbedaan yang jauh dengan pengukuran *Terrestrial Laser Scanning (TLS)*.

Metode *Structure from Motion (SfM)* merupakan perkembangan dalam *computer vision* dimana dikombinasikannya bidang ilmu matematika dan teknik untuk mendapatkan bentuk 3 dimensi untuk mendapatkan penampakan objek sesuai yang dilihat (Szeliski, 2010). Proses dalam *structure from Motion (SfM)* meliputi mengidentifikasi point dalam dua atau lebih sudut pandang yang terproyeksi dalam jarak antar titik yang sama menggunakan *bundle adjustment* (Cipolla, 2008).

Pada penelitian ini, tujuannya adalah pemodelan 3D Candi Wringinlawang menggunakan metode *Structure from Motion (SfM)*. Metode ini diambil dari metode penelitian yang dilakukan Suwardhi dkk (2015), Hidayat (2015), dan Putra (2015). Penelitian ini juga melanjutkan model 3D Candi Wringinlawang yang dibuat Disura (2014) menjadi model 3D yang tergeoreferensi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai data acuan untuk inspeksi dan pemeliharaan bangunan serta proses pemugaran di kemudian hari.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian ini adalah:

1. Bagaimana cara mendokumentasikan bentuk geometri Candi Wringinlawang ?
2. Bagaimana menganalisis secara geometrik model 3D yang dihasilkan?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam Tugas Akhir ini meliputi :

1. Pengambilan foto Candi Wringinlawang dilakukan menggunakan kamera Sony EXMOR 1/2.3" CMOS 12.4 MP dengan wahana DJI Phantom 3
2. Pemodelan 3D dilakukan pada bentuk *exterior* bagian Candi Wringinlawang

3. Kalibrasi kamera secara *self-calibration*
4. Pengolahan data foto dalam pembentukan model 3D menggunakan metode *Structure From Motion* (SFM)
5. Jumlah titik kontrol terdiri atas 8 buah titik dan 22 buah titik ICP
6. Koordinat titik kontrol tanah diukur menggunakan GPS Geodetic metode statik
7. Koordinat pada badan candi didapat dari pengukuran dengan Total Station reflectorless
8. Analisa ketelitian dengan membandingkan koordinat pada model yang dihasilkan dengan koordinat (X, Y, Z) ICP
9. Model Candi termasuk dalam LoD 3 dengan toleransi 0.5 m

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Membuat model 3D Candi Wringinlawang dengan metode *Structure from Motion (SfM)* yang tergeoreferensi
2. Menganalisis ketelitian geometrik model 3D Candi Wringinlawang

1.5 Relevansi atau Manfaat Kegiatan Tugas Akhir

Manfaat yang diharapkan dari pekerjaan ini adalah mendapat model 3D dari objek bersejarah khususnya candi Wringinlawang. Hasil dari kegiatan ini dapat digunakan sebagai upaya pendokumentasian situs budaya di Indonesia sesuai pasal 53 ayat 4 Undang-Undang Nomor 11 tahun 2010 tentang Cagar Budaya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Candi Wringinlawang



Gambar 2. 1 Candi Wringinlawang
(candi.perpusnas.go.id 2014)

Dikutip dari Perpustakaan Nasional RI (2014), Candi Wringinlawang terletak di Dukuh Wringinlawang, Desa Jati Pasar, Kecamatan Trowulan, Kabupaten Mojokerto. Candi ini berada pada 11 km dari Mojokerto ke arah Jombang. Konon dahulu di dekat candi terdapat pohon beringin yang besar sehingga candi ini dinamakan Candi Wringinlawang (dalam bahasa Jawa, wringin berarti beringin, lawang berarti pintu).

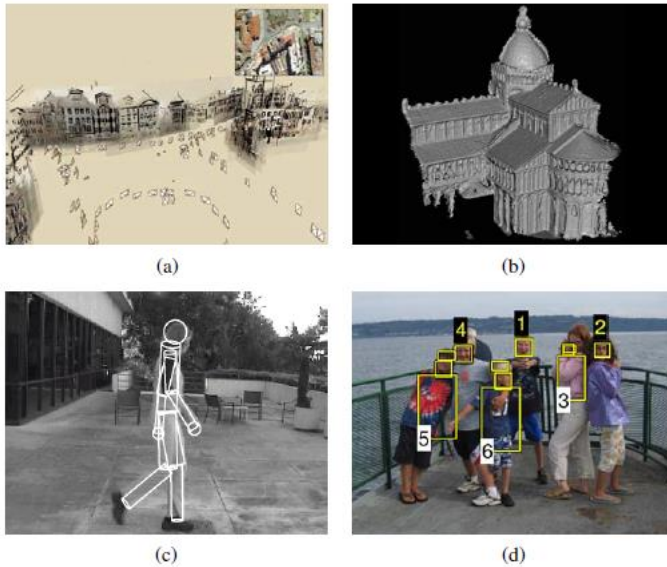
Ditinjau dari segi historis, Candi Wringinlawang belum diketahui secara pasti kapan dibangun, tapi diperkirakan pada abad ke XIV. Bangunan ini mulai dikenal pada tahun 1815 oleh Raffles

dalam bukunya: *History Of Java* 1 yang disebut dengan nama “Gapuro Jatipasar”. Sementara berdasarkan cerita Knebel dalam tulisannya tahun 1907 menyebutkan sebagai Gapuro Wringinlawang. Gapuro Wringinlawang kemudian di publikasikan kembali pada tahun 1912 dimana candi ini ditemukan oleh masyarakat setempat. (Departemen Kebudayaan dan Pariwisata, 2007 dalam Kurniasih, 2015).

Gapura Wringinlawang telah mengalami pemugaran yang dilaksanakan sejak tahun 1991 sampai dengan tahun 1995. Keseluruhan bangunan yang menghadap timur-barat ini terbuat dari bata merah. Fondasi gapura berbentuk segi empat dengan ukuran 13 x 11.50 m. Sebelum dipugar belahan selatan gapura masih utuh, berdiri tegak dengan ketinggian 15.50 m., sementara belahan utara hanya tersisa 9 meter.

2.2 Computer Vision

Penelitian dalam bidang *computer vision* berkembang dengan mengombinasikan matematika dan teknik untuk mendapatkan bentuk 3 dimensi dan penampakan objek sesuai yang dilihat manusia. Seperti yang dilihat dalam gambar 2.2 a, terlihat model 3D didapatkan dari banyak foto yang bertampalan. Pada gambar 2.2 b didapatkan model 3D dari permukaan yang akurat menggunakan *stereo matching*. Gambar 2.2c juga menunjukkan bagaimana cara melacak pergerakan seseorang serta pada gambar 2.2 d terlihat bagaimana cara mengetahui dan mencari nama dari semua orang menggunakan deteksi wajah, baju, dan rambut (Szeliski, 2010).



Gambar 2. 2 Contoh dari algoritma *computer vision* :
 a) *Structure from Motion* ; b) *Stereo Matching*; c) *Person tracking algorithms* ; d) *face detection*
 (Szeliski, 2010)

Computer vision pada dasarnya untuk mendeskripsikan tentang dunia yang dilihat dalam satu atau banyak gambar dan merekonstruksinya sebagai sebuah properti sehingga dapat terlihat bentuk, keterangan, dan distribusi warnanya. Model yang digunakan dalam *computer vision* terdiri atas fisika (radiometry, optik dan sensor) dan berada dalam *computer graphics*.

Kabar baiknya, *Computer vision* saat ini sudah digunakan secara luas dalam berbagai aplikasi seperti :

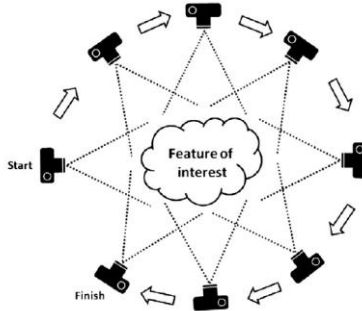
- a. *Optical character recognition* (OCR) : membaca kode pos pada surat

- b. *Machine inspection* : untuk menginspeksi kualitas dengan mengukur toleransi pada sayap atau badan pesawat
- c. Pemodelan 3D gedung (fotogrametri)
- d. *Motion Capture*
- e. *Surveillance* : memantau lalu lintas
- f. dsb

2.3 Structure from Motion (SfM)

Structure-from-Motion (SfM) merupakan pendekatan untuk sekumpulan gambar dengan tingkat overlap tinggi yang didapat dari sensor yang bergerak sehingga dapat menangkap struktur 3 dimensi secara keseluruhan lokasi dari berbagai macam posisi (Westoby dkk, 2012). Di era perkembangan *computer vision* dan *image analysis*, SfM mengawali otomatisasi metode fotogrametri untuk membentuk *3D point cloud*. SfM hanya memerlukan sedikit GCP dan dapat digunakan pada gambar dari low-cost non metric camera dengan pengambilan foto secara terestris atau aerial (Javernick dkk, 2014).

Structure-from-Motion (SfM) memiliki prinsip yang sama dengan fotogrametri stereoskopik dimana model 3D didapatkan dari foto yang saling bertampalan. Tetapi, secara dasar berbeda dengan fotogrametri tradisional, karena posisi kamera dan orientasi diketahui secara otomatis tanpa harus menentukan titik – titik kontrol 3D. Hal ini diselesaikan secara bersamaan menggunakan prosedur *bundle adjustment* yang iteratif, berdasarkan database dari fitur yang diambil secara otomatis dari beberapa gambar yang bertampalan (Westoby dkk, 2012).



Gambar 2. 3 Posisi pengambilan gambar *Structure-from-Motion* (Westoby dkk, 2012)

2.3.1 Digital Image Matching

Feature detection dan *image matching* merupakan dua hal penting dalam fotogrametri. Keduanya semakin berkembang pengaplikasiannya. Dari fotogrametri yang sederhana seperti mengidentifikasi feature yang dibentuk oleh *software 3D modelling*, ada beberapa aplikasi yang menggunakan *image matching* sebagai hal penting. Hal ini turut mendasari semakin tahun kebutuhan fotogrametri dan *computer vision* termasuk *feature detection*, *image matching*, dan pemodelan 3D. *Feature detection* merupakan langkah awal sebelum *image matching* ketika akan merepresentasikan model 3D (Guerrero, 2011).

Metode untuk *image matching* tergantung pada gambar yang akan dipasangkan dan variasi dari gambar atau dipengaruhi 4 parameter yakni skala, orientasi, objek yang akan dipasangkan, kecerahan. Beberapa algoritma *image matching* dapat diterima dengan baik pada beberapa gambar yang memiliki kondisi yang sama sesuai parameter yang ada. Tetapi pada dasarnya belum ada

algorithm yang benar-benar mentolerir parameter-parameter tersebut.

a. Feature Detecting

SIFT merupakan sebuah algoritma dalam *computer vision* untuk mendeteksi dan mendeskripsikan fitur lokal dalam gambar. Algoritma ini dipublikasikan oleh David Lowe pada tahun 1999. Dengan menggunakan SIFT ini, suatu citra akan di ubah menjadi *vector fitur lokal* yang kemudian digunakan sebagai pendekatan dalam mendeteksi maupun mengenali objek yang dimaksud melalui titik titik point atau keypoint. Sampel gradien gambar terukur pada 16x16 lokasi dalam skala ruang (Dalam sistem koordinat lokal untuk rotasi dan invarian skala).



Gambar 2. 4 SIFT

(Girod, 2013)

SIFT cocok digunakan untuk memasang gambar karena pengulangan dan invarianasinya terhadap perubahan gambar geometris dan fotometrik tertentu. SIFT detector bekerja dengan mengaplikasikan *Differences of Gaussian (DoG)* lalu mencari semua nilai maksimum dan minimum dari gambar yang difilter, setiap posisi (x y) dinggal lokasi feature. Salah satu inovasi SIFT adalah mendeteksi fitur pada beberapa skala. Hasilnya adalah

bahwa meskipun sebuah objek muncul pada skala yang berbeda dalam dua gambar.

SIFT menghitung histogram dari *local image* dan membentuk 4x4 grid histogram di sekitar *feature point* dimana setiap histogram mengandung 8 bins untuk arah. sehingga setiap *feature* terdiri atas lokasi 2D (f_x, f_y) dan descriptor vector (f_d). Banyaknya feature SIFT dideteksi berdasarkan resolusi dan konten dari gambar (Snavely, 2010).

Tipe Feature ada 3 (Anonim, 2008) :

- point
- line
- poligon



Gambar 2. 5 Tipe Feature
(Anonim, 2008)

b. *Feature Matching*

Feature matching bekerja dengan mendeteksi *interest point* dalam gambar seperti titik pojok dalam sepasang *view*. *Local neighborhood* dari sejumlah titik merupakan intensitas variasi dan relatif mudah dibedakan.

Setelah mendeteksi titik, gambar yang ditampilkan dapat di kelaskan menurut pendeskripsiannya. feature dengan deskripsi yang sama akan dianggap berpasangan.

Teknik *Feature matching* terbagi menjadi dua kategori : *narrow* dan *wide-baseline* (Cipolla, 2008).

a. *Narrow-baseline matching*

Dengan mengasumsikan perubahan posisi kamera dan orientasinya kecil, *interest point* dan sekelilingnya akan terlihat sama dalam dua *view* yang berdekatan. sehingga *feature* dalam gambar dapat dikarakteristikan secara sederhana dengan sekumpulan nilai intensitas pixel yang diambil dari persegi empat yang berada di pusat dari *interest point*. Nilai intensitas pixel akan dikombinasikan dengan korelasi *normalised cross* atau jumlah dari perbedaan kuadrat. Kerugian dari *narrow-baseline matching* adalah perhitungan kedalaman cukup sensitif terhadap gangguan dalam pengukuran koordinat terhadap citra untuk sudut pandang jarak dekat.

b. *Wide-baseline matching*

Dibandingkan dengan narrow baseline matching, algoritma ini menunjukkan hasil yang lebih baik pada rangkaian video yang menggunakan pengamatan jarak dekat, dan tidak bisa digunakan pada gambar yang didapatkan menggunakan pengamatan dengan konfigurasi pada umumnya. ketika baseline panjang, permukaan pada dua gambar dapat menunjukan perubahan skala yang besar, perbedaan derajat, perbedaan pola, dan perbedaan besar. semua faktor ini membuat pencocokan otomatis menjadi lebih sulit.

2.4 Kalibrasi Kamera

Kalibrasi kamera dilakukan untuk menentukan parameter distorsi (distorsi radial dan distorsi tangensial), panjang titik utama (c), titik pusat fidusial foto (X_o, Y_o), parameter rotasi (ω, ϕ, κ). Distorsi lensa dapat menyebabkan bergesernya titik pada foto dari posisi yang sebenarnya, sehingga memberikan ketelitian pengukuran yang tidak baik, namun tidak mempengaruhi kualitas ketajaman citra yang dihasilkan (Fraser, 2015).

Kalibrasi kamera dapat dilakukan dengan beberapa metode, yaitu (Harintaka, 2009) :

1. *Laboratory calibration*

Merupakan kalibrasi yang dilakukan di laboratorium dan terpisah dengan pemotretan obyek. Metode ini cocok digunakan untuk kalibrasi kamera metrik. Metode ini terbagi menjadi dua jenis, yaitu *optical laboratory calibration* dan *test range calibration*.

2. *In field calibration*

Parameter kalibrasi kamera dihitung menggunakan prinsip *bundle adjustment*, *plumb line*, atau *Direct Linear transform* (DLT)

3. *Self calibration*

Kalibrasi pada saat pemotretan dikenal dengan *self calibration*, yakni mengkalibrasi kamera sekaligus pada obyek amat dan data diambil bersamaan dengan data observasi. Pengukuran titik titik target pada obyek pengamatan digunakan sebagai data untuk penentuan titik obyek sekaligus untuk menentukan parameter kalibrasi kamera.

2.4.1 Distorsi

Distorsi merupakan ketidaksesuaian bentuk obyek yang ada di dunia nyata dengan bentuk obyek pada foto. Distorsi geometrik pada Foto Udara Format Kecil (FUFK) cenderung lebih kompleks daripada foto udara standar (foto udara metrik), dan secara spesifik dapat dikelompokkan dalam 2 kondisi, yaitu kondisi intrinsik dan kondisi proses.

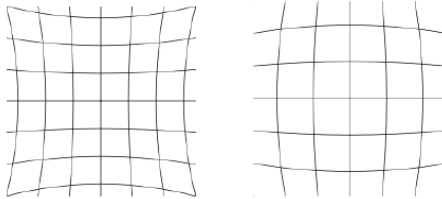
Kondisi proses yang disebabkan oleh operasional penggunaan pesawat ringan untuk pemotretan. Jenis pesawat ini sangat dipengaruhi oleh kondisi angin dan ketidaksinkronan antara saat pemotretan dan kecepatan pesawat yang menyebabkan posisi (X, Y, Z) dan orientasi (ω, ϕ, κ) kamera pada saat pemotretan yang dapat sangat bervariasi antar foto. Kondisi proses pemotretan ini dapat menyebabkan: variasi skala yang beragam antar foto, ketidakteraturan pertampalan (*overlap*) foto udara baik ke arah jalur terbang dan antar jalur terbang, dan rasio B/H (*Base/Height Ratio*).

Kondisi intrinsik dapat disebabkan karena lensa yang digunakan memiliki kualitas yang kurang baik sehingga terjadi perubahan arah sinar yang keluar dari lensa dan yang masuk menjadi tidak sejajar. Distorsi pada lensa menyebabkan kesalahan geometrik atau bentuk obyek pada foto, namun tidak mengurangi ketajamannya dari hasil pemotretan kamera. Kesalahan tersebut mengakibatkan adanya penyimpangan geometri pada foto dengan geometri obyek sebenarnya. Distorsi lensa dibedakan menjadi dua yaitu distorsi radial dan tangensial (Wolf, 1993 dalam Wijayanto, 2016).

a. Distorsi radial (Δr)

Distorsi radial merupakan pergeseran linier titik foto dalam arah radial terhadap titik utama dari posisi idealnya. Distorsi radial ke arah dalam disebut sebagai *pinchusion*

distortion, dan distorsi radial ke arah luar disebut *barrel distortion*. Perbedaan keduanya dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 2. 6 distorsi radial

kiri : *pinchusion distortion*, kanan: *barrel distortion*

(Hanifa, 2007)

Distorsi radial dideskripsikan sebagai polinom dari jarak radial terhadap titik utama foto.

$$\delta x = (x - x_p)(K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7)$$

$$\delta y = (y - y_p)(K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7)$$

dengan

$$r^2 = (x - x_p)^2 + (y - y_p)^2$$

dimana :

δx δy = besar distorsi radial (μm)

K_1, K_2, K_3 = parameter distorsi radial

r = Jarak radial titik citra terhadap titik utama foto (mm)

x_p y_p = titik pusat foto (mm)

x y = koordinat di foto (mm)

b. Distorsi Tangensial

Distorsi tangensial merupakan pergeseran linier titik di foto pada arah normal (tegak lurus) garis radial melalui titik foto tersebut. Distorsi tangensial disebabkan titik pusat elemen-elemen lensa tidak terletak dalam satu garis lurus.

Pergeseran ini biasa dideskripsikan dengan dua persamaan kuadratik untuk pergeseran pada arah x dan y.

$$\begin{aligned}\delta x &= \left[P_1 \left[r^2 + 2(x - x_p)^2 \right] + 2P_2(x - x_p)(y - y_p) \right] (1 + P_3 r^2) \\ \delta y &= \left[2P_1(x - x_p)(y - y_p) + 2P_2 \left(r^2 + 2(y - y_p)^2 \right) \right] (1 + P_3 r^2)\end{aligned}$$

dengan

$$r^2 = (x - x_p)^2 + (y - y_p)^2$$

dimana :

δx = besar pergeseran sumbu x (μm)

δy = besar pergeseran sumbu y (μm)

P_1, P_2, P_3 = parameter distorsi tangensial

r = Jarak radial titik citra terhadap titik utama foto (mm)

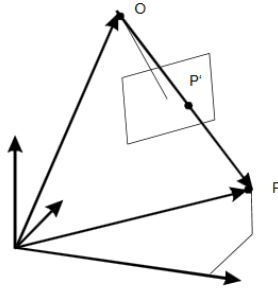
x_p, y_p = titik pusat foto (mm)

x, y = koordinat di foto (mm)

2.4.2 Self Calibration Bundle Adjustment

Bundle Adjustment merupakan metode untuk menghitung koordinat objek dan elemen dari orientasi luar dengan gambar bertampalan dan jumlah yang tidak terbatas. Hal itu didapat dari prinsip *analytical photogrammetry* menggunakan metode perataan kuadrat terkecil untuk menyelesaikan rumus observasi yang kompleks. Dengan perkembangan dari *close-range photogrammetry*, *bundle adjustment* digunakan pada gambar yang miring dan tidak terbatas (Lin & Chio, 2012).

Analytical photogrammetry berdasar pada kondisi kolinear dimana diasumsikan titik exposure, titik objek, dan titik pada gambar yang berada pada satu garis lurus dalam ruang 3D.



Gambar 2. 7 Gambar kondisi kolinear
(Jacobsen, 2009)

Model matematika dari *bundle adjustment* itu tidak linear, sehingga perlu pendekatan nilai. Semua pendekatan biasanya dihitung dengan urutan orientasi relatif, orientasi absolut sebaik *space resection*.

Self Calibration bundle adjustment dapat digunakan untuk mengetahui parameter kamera seperti panjang fokus, titik pusat foto, distorsi radial, distorsi tangensial. Dengan menggunakan *self calibration* untuk posisi yang presisi dan orientasi, parameter kamera dan EOP (*Exterior Orientation Parameters*) tersedia bersamaan.

$$x_a - x_o + \Delta x = -f \frac{(r_{11}(X_A - X_L) + r_{21}(Y_A - Y_L) + r_{31}(Z_A - Z_L))}{(r_{13}(X_A - X_L) + r_{23}(Y_A - Y_L) + r_{33}(Z_A - Z_L))}$$

$$y_a - y_o + \Delta y = -f \frac{(r_{12}(X_A - X_L) + r_{22}(Y_A - Y_L) + r_{23}(Z_A - Z_L))}{(r_{13}(X_A - X_L) + r_{23}(Y_A - Y_L) + r_{33}(Z_A - Z_L))}$$

Dimana :

Δx , Δy merupakan kesalahan sistematik dari gambar yang umumnya berupa fungsi dari koordinat foto bertujuan untuk menghasilkan distorsi lensa khususnya di kamera digital.

2.5 3D Modelling

Hasil pemodelan 3D dapat dinilai dari segi bentuk dan ukuran. Untuk segi bentuk, *Level Of Detail (LOD)* dapat menggambarkan. Sedangkan untuk ukurannya dapat diuji menggunakan uji statistik.

2.5.1 Level Of Detail

Menurut Biljecki (2013), dalam geomatika dan kartografi, skala peta sangat umum diterapkan, dan Thompson (2009) memberikan gambaran yang baik tentang skala yakni skala peta adalah rasio jarak di atas kertas dengan jarak dari obyek dunia nyata yang dipetakan. Istilah "skala kecil" digunakan untuk kasus-kasus di mana sejumlah kecil dari kertas diperlukan untuk mewakili suatu wilayah. Skala besar membutuhkan lembar kertas yang lebih besar.

Konsep *Level of Detail* terkait erat dengan konsep skala peta tersebut, dan LoD dipelopori oleh Clark (1976) yang menyebutkan bahwa struktur data hierarki jika dimana seseorang akan mendeskripsikan sebuah objek secara rinci maka ia akan menyusuri objek tersebut lebih dalam. Deskripsi sebuah objek yang kurang rinci dikarenakan adanya material yang mendefinisikan sebuah objek secara lebih luas. Maka semakin rinci deskripsi sebuah objek, mengandung semakin banyak material atau geometri didalamnya. Berikut merupakan 5 tingkatan level of detail :

- **LoD0**

Untuk setiap bangunan atau gedung bagian tapak atau atap garis diwakili oleh poligon horisontal dengan tinggi mutlak dan konstan yang didefinisikan dengan baik.

- **LoD1**

Untuk setiap bangunan atau bangunan bagian kulit luar yang umum diwakili oleh tepat satu prisma ekstrusi padat. Tanah,

lantai dan atap permukaan harus horisontal, permukaan batas lateral yang harus vertikal.

- **LoD2**

Untuk setiap bangunan atau bagian bangunan terluar geometris sederhana diwakili oleh permukaan luar horizontal atau vertikal dan bentuk atap disederhanakan. Semua jenis permukaan dan elemen bangunan tambahan dapat direpresentasikan sebagai objek semantik.

- **LoD3**

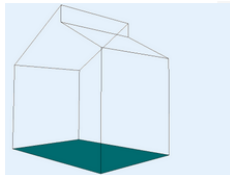
Untuk setiap bangunan atau gedung bagian kulit terluar geometris rinci diwakili oleh permukaan luar rinci dan bentuk atap rinci. Semua jenis permukaan dan elemen bangunan tambahan dapat lebih rinci direpresentasikan sebagai objek semantik. Dalam hal LoD2 pintu dan jendela dapat dimodelkan sebagai objek tematik datar.

- **LoD4**

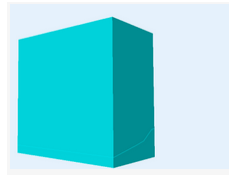
Untuk setiap bangunan atau bagian bangunan terluar geometris rinci dan interior diwakili oleh permukaan luar dan dalam rinci dan bentuk atap rinci. Semua jenis permukaan dan elemen bangunan bergerak bergerak dan non tambahan dapat diwakili dengan lebih rinci sebagai objek semantik.



Bangunan Asli



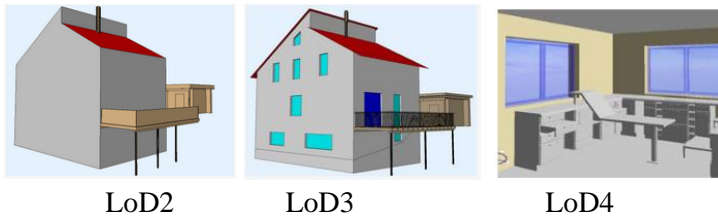
LoD0



LoD1

Gambar 2. 8 Level Of Detail

(Biljecki, 2013)



Gambar 2. 9 Level of Detail
(Biljecki, 2013)

Menurut Fan dan Meng (2009), *Level of Detail* dideskripsikan dengan persyaratan akurasi sebagai berikut :

Tabel 2 1 Persyaratan Akurasi LoD

Aspek	LoD1	LoD 2	LoD 3	LoD 4
Skala model	Kota, regional	Distrik dalam kota	Model arsitektur (exterior), landmark	Model arsitektur (interior)
Kelas akurasi	Rendah	menengah	tinggi	Sangat tinggi
Akurasi posisi dan tinggi	5 m	2 m	0.5 m	0.2 m
Instalasi bangunan	-	-	Efek visual exterior representatif	Obyek dalam bentuk ukuran sebenarnya
Generalisasi	Ukuran obyek >6x6m	Ukuran obyek >4x4m	Obyek sebagai fitur nyata >2x2m	Elemen konstruktif ditampilkan
Struktur	datar	Tipe dan orientasi atap	Sesuai bentuk obyek sesungguhnya	Sesuai bentuk obyek sesungguhnya

(sumber : Fan & Meng, 2009)

Tingkat LoD 0 tidak disertakan pada tabel karena tidak dianggap sebagai objek model 3D sebab objek LoD 0 merupakan representasi batas secara 2D dengan ketinggian sebagai atributnya (Biljecki, 2013).

2.5.2 Uji Ketelitian

1. Titik Kontrol dan Titik Uji

Titik yang dimanifestasikan di lapangan dalam bentuk monumen dan koordinatnya ditentukan dengan metode pengukuran geodetik serta dinyatakan dalam sistem referensi koordinat tertentu (BSN, 2002).

Titik kontrol tanah atau GCP (*Ground Control Point*) memiliki peran penting untuk mengoreksi data dan memperbaiki keseluruhan citra. Tingkat akurasi titik kontrol tanah sangat bergantung pada jenis GPS yang digunakan dan jumlah sampel titik terhadap lokasi dan waktu pengambilan (Hasyim, 2009 dalam Kurniawan dkk, 2015).

Untuk uji ketelitian posisi dari hasil koreksi citra, hal yang dilakukan selanjutnya adalah membandingkan dengan menggunakan titik uji (ICP). Adapun ICP yang digunakan harus memenuhi ketentuan objek seperti berikut (BIG, 2014):

- a. dapat diidentifikasi dengan jelas di lapangan dan di peta yang akan diuji
- b. merupakan objek yang relatif tetap dan tidak berubah bentuk dalam jangka waktu yang singkat
- c. memiliki sebaran yang merata di seluruh area yang akan diuji

Nilai CE90 untuk ketelitian horizontal dan LE90 untuk ketelitian vertikal, yang berarti bahwa kesalahan posisi peta

dasar tidak melebihi nilai ketelitian tersebut dengan tingkat kepercayaan 90%.

Nilai CE90 dan LE90 dapat diperoleh dengan rumus mengacu kepada standar sebagai berikut *US NMAS (United States National Map Accuracy Standards)* sebagai berikut (BIG, 2014):

$$CE90 = 1.5175 \times RMSEr$$

$$LE90 = 1.6499 \times RMSEz$$

2. Uji Error Probability

Uji *Error Probability* ini untuk mendeteksi kemungkinan error dari suatu data. *Standar errors* dan presentase kemungkinan kesalahan digunakan untuk mengevaluasi dari diterimanya suatu ukuran. Spesifikasi dan ketentuan dibutuhkan dalam diterima tidaknya kesalahan dengan batas tertentu seperti 90% dan 95 %. Dengan kesalahan 95% disebut dengan two-sigma error (2σ) dimana dihitung dengan pendekatan 2σ .

Semakin tinggi presentase errornya yang digunakan membantu menyaring data yang memiliki kesalahan besar dan data blunder dalam data. Umumnya, data yang memiliki perbedaan dari 3σ dapat dianggap data blunder dan sebaiknya dihilangkan dari kumpulan data (Ghilani dan Wolf, 2006).

Tabel 2 2 *Multipliers for various percent probable errors*

<i>Symbol</i>	<i>Multiplier</i>	<i>Percent Probable Errors</i>
E ₅₀	0.6745 σ	50
E ₉₀	1.645 σ	90
E ₉₅	1.960 σ	95
E ₉₉	2.576 σ	99
E _{99.7}	2.968 σ	99.7
E _{99.9}	3.29 σ	99.9

(sumber : Ghilani dan Wolf, 2006)

3. Root mean Square Error (RMSE)

Root Mean Square (RMSE) merupakan ukuran perbedaan antara nilai besaran yang diprediksi dengan nilai yang diamati sebenarnya. RMSE digunakan untuk menyatakan akurasi suatu prediksi besaran dan didefinisikan dengan persamaan berikut (Septifa, 2013) :

$$RMSE\ X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{foto} - x_{TS})^2}{n}}$$

$$RMSE\ Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{foto} - Y_{TS})^2}{n}}$$

$$RMSE\ Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{foto} - Z_{TS})^2}{n}}$$

Keterangan :

x_{foto} Y_{foto} Z_{foto} = nilai prediksi ke -i

x_{TS} Y_{TS} Z_{TS} = nilai pengamatan ke-i

n = jumlah pengamatan

4. Kesalahan 3D per titik

Menurut Pasumansky (2014), untuk mengetahui kesalahan 3D per titik pada dasarnya adalah jarak dari posisi estimasi dan sebenarnya. Sehingga untuk mengetahui kesalahan 3D per titik menggunakan persamaan seperti berikut :

$$\text{Error} = \sqrt{(X_{error})^2 + (Y_{error})^2 + (Z_{error})^2}$$

Dimana :

$X_{error} = X_{estimasi} - X_{cek}$

$Y_{error} = Y_{estimasi} - Y_{cek}$

$Z_{error} = Z_{estimasi} - Z_{cek}$

2.6 Spesifikasi Kamera dan Wahana

Phantom 3 merupakan generasi dari quadcopter milik DJI. Dapat digunakan untuk merekam video kualitas 4K. Wahana ini dilengkapi dengan kamera Sony EXMOR dengan sensor CMOS yang terpasang pada gimbal di bagian bawah wahana. Kamera yang terpasang dengan gimbal ini untuk memaksimalkan stabilitas yang dikarenakan berat dan ukurannya (DJI, 2016).



Gambar 2. 10 *DJI Phantom 3*
(sumber : *dji.com*, 2016)

2.6.1 Kamera Sony Exmor

Tabel 2 3. Spesifikasi kamera Sony EXMOR

Sensor	Sony EXMOR ½.3” CMOS. Effective pixels : 12.4 M
Lens	FOV 94 20mm (35mm format equivalent) f/2.8
ISO Range	100-3200 (video) 100-1600 (foto)
Electronic Shutter Speed	8s-1/8000s
Image Max Size	4000x3000
Photography Mode	Single Shot Burst shooting : 3/5/7 framesAuto Exposure Bracketing (AEB) :3/5 at 0.7 EV Bias Timelapse
Photo Formats	JPEG, DNG

(sumber : *user manual Phantom 3*, 2016)

2.6.2 Wahana DJI Phantom 3

Tabel 2 4 Spesifikasi Wahana *DJI Phantom 3*

Berat (termasuk baterai dan baling-baling)	1280 g
Ukuran diagonal (termasuk baling-baling)	350 mm
Kecepatan naik maksimal	5 m/s
Kecepatan turun maksimal	3 m/s
Kecepatan maksimum	16 m/s
Tinggi maksimal (dalam mdpl)	19685 feet (6000 m)
Waktu maksimal terbang	23 menit
Rentang suhu	32° - 104° F (0°-40° C)
Satellite Positioning Systems	GPS/GLONASS
Hover Accuracy Range	Vertikal : ± 0.1 m (ketika positioning terhadap jarak pandang aktif)

	$\pm 0.5 \text{ m}$ Horizontal : $\pm 1.5 \text{ m}$
Vision System	Downward Vision System
Kecepatan	$\leq 8 \text{ m/s}$
Z	50 – 300 cm
Operating Range	50 – 300 cm
Gimbal : Jarak operator	Pitch: - 90° - (+30°)
Remote	
Model	GL358wB, GL390wB
Frekuensi	5.725 GHz – 5.825 GHz
Jarak transmisi maksimal	FCC: 1200m, CE: 500 m
Rentang Suhu	0° -40° C
Battery	2600 mAh LiPo 18650 2S
Working Voltage	300 mA, 7.4 V

(sumber : *user manual Phantom 3*, 2016)

2.7 Penelitian Terdahulu

Penelitian yang mendasari penulis dalam pemilihan judul dan topik pembahasan diantaranya adalah penelitian yang dilakukan oleh Suwardhi dkk (2015) yang berjudul *Digital 3D Borobudur : Integration Of 3D Surveying and Modelling Techniques*. Penelitian ini berstudi kasus di Candi Borobudur yang menjadi salah satu warisan dunia menurut UNESCO. Penelitian tersebut memanfaatkan teknologi fotogrametri jarak dekat dengan menggunakan *aerial* maupun *terestris Photogrammetry*.

Untuk instrumen dalam pengambilan foto dari udara yang digunakan adalah *Unmanned Aerial Vehicle(UAV)* tipe *fixed-wing* dan *Hexa-copter*. *Fixed-wing* merekam area Borobudur seluas 1 km x 1 km sedangkan *hexa-copter* terbang dengan ketinggian yang lebih rendah dan mengambil gambar candi seluas 120 m x 120 m. Sedangkan untuk pengambilan foto dari darat, kamera yang digunakan adalah Sony RX100.

Produk yang dihasilkan ketiganya adalah sebagai berikut :

Tabel 2 5 Produk dari Penelitian di Candi Borobudur

	Data	Scene	Resolusi	Produk
LOD0	Fixed-wing UAV	Landscape dan candi	5 cm	DEM, orho
LOD1	Hexa-copter UAV (tegak)	Candi dan stupa	2 cm	Ortho, 3D models
LOD2	Hexa-copter UAV (miring)	Stupa dan ornamen	1 cm	3D models
LOD3	Gambar terestris	Relief	Sub-cm	3D models

(sumber : Suwardhi dkk, 2015)

Penelitian kedua yang turut mendasari yakni *3D Reconstruction of Singosari Temple Using Terrestrial Images and Structure From Motion Algorithm* oleh Hidayat dan Cahyono (2015). Penelitian ini berstudi kasus di Candi Singosari, Kabupaten Malang. Dengan menggunakan foto terestrial yang diproses menggunakan algoritma *Structure From Motion*. Instrumen kamera yang digunakan adalah Canon Powershoot SX260 HS.

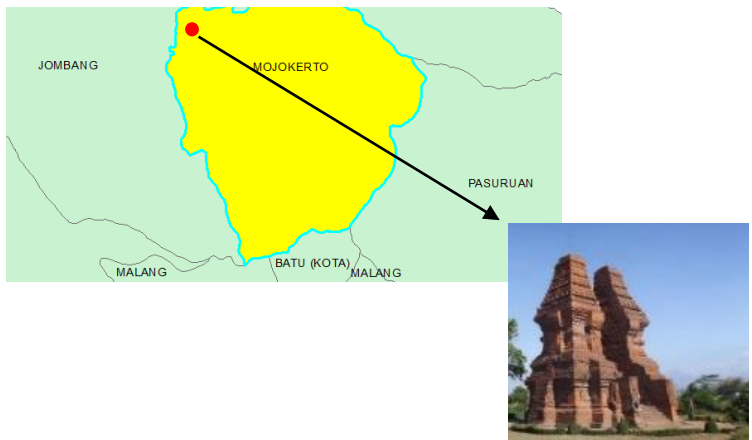
Pengambilan foto dilakukan di setiap bagian dari candi sehingga dihasilkan 39 gambar dari objek.

Dari kedua penelitian tersebut, penulis mengusulkan judul “Pemodelan 3 Dimensi Candi Wringinlawang Menggunakan Metode Structure From Motion Untuk Dokumentasi Cagar Budaya”. Dimana penulis menggunakan algoritma *Structure from Motion (SfM)* yang sama dengan penelitian Candi Singosari (Hidayat dan Cahyono, 2015). Untuk pengambilan gambar, penulis menggunakan UAV dengan tipe *quadcopter* dan juga menggunakan kamera DSLR Nikon D3100 untuk pengambilan foto daratnya.

BAB III METODOLOGI

3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi yang dijadikan studi kasus pada penelitian Tugas Akhir ini adalah Candi Wringinlawang. Candi ini terletak di Desa Jati Pasar, Kecamatan Trowulan, Kabupaten Mojokerto, tepatnya 11 km dari Mojokerto ke arah Jombang. Candi Wringinlawang memiliki koordinat -7.5410693° LS, 112.3879172° BT.



Gambar 3. 1 Lokasi Penelitian

3.2 Data dan Peralatan

3.2.1 Data

Data pendukung penelitian tugas akhir ini sebagai berikut:

- 1) Foto Candi Wringinlawang berbagai sisi didapatkan dengan kamera Sony Exmor menggunakan wahana drone DJI Phantom 3
- 2) Koordinat (x,y,z) titik GCP dari pengukuran *GPS Geodetik* sebagai data acuan georeference
- 3) Koordinat (x,y,z) di objek diukur menggunakan pengukuran *Total Station Reflektorless* sebagai *Independent Check Point* (ICP) dan titik kontrol

3.2.2 Peralatan

Peralatan yang mendukung penelitian tugas akhir ini terbagi menjadi 2 yaitu :

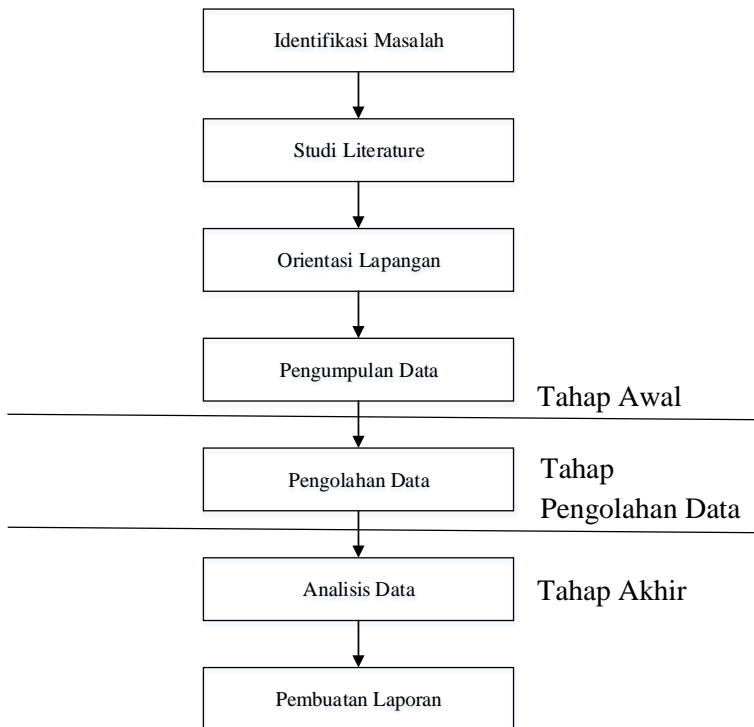
- 1) *Hardware*
 - a. Kamera non-metrik Sony Exmor 12.4 M
 - b. Drone DJI Phantom 3 sebagai wahana kamera
 - c. *Total Station Reflectorless Hi-Target*
 - d. 2 set *GPS Geodetic Topcon Hiper-Pro*
 - e. *Personal Computer (PC)*
Windows 7 Ultimate
Manufacturer msi
Pprocessor Intel (R) Core (TM) i5-4460
CPU @3.20 GHz
RAM 8.00 GB
64-bit Operating System
 - f. *Marker*
 - g. *Distometer*

2) *Software*

- Microsoft Office
- Software pengolah SfM

3.3 Metodologi Penelitian

Tahapan yang dilakukan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :



Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian

3.3.1 Tahap Awal

Pada tahap awal ada beberapa hal yang dilakukan yakni sebagai berikut :

1. Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah objek penelitian yakni Candi Wringinlawang. Selain itu dilakukan pembatasan masalah dalam tugas akhir ini.

2. Studi Literature

Melakukan studi literature mengenai teori terkait, metode pada penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya, objek yang akan diteliti, serta *software* untuk pengolahnya. Studi literature dilakukan pada jurnal, tugas akhir penelitian sebelumnya, internet, buku, dll.

3. Orientasi Lapangan

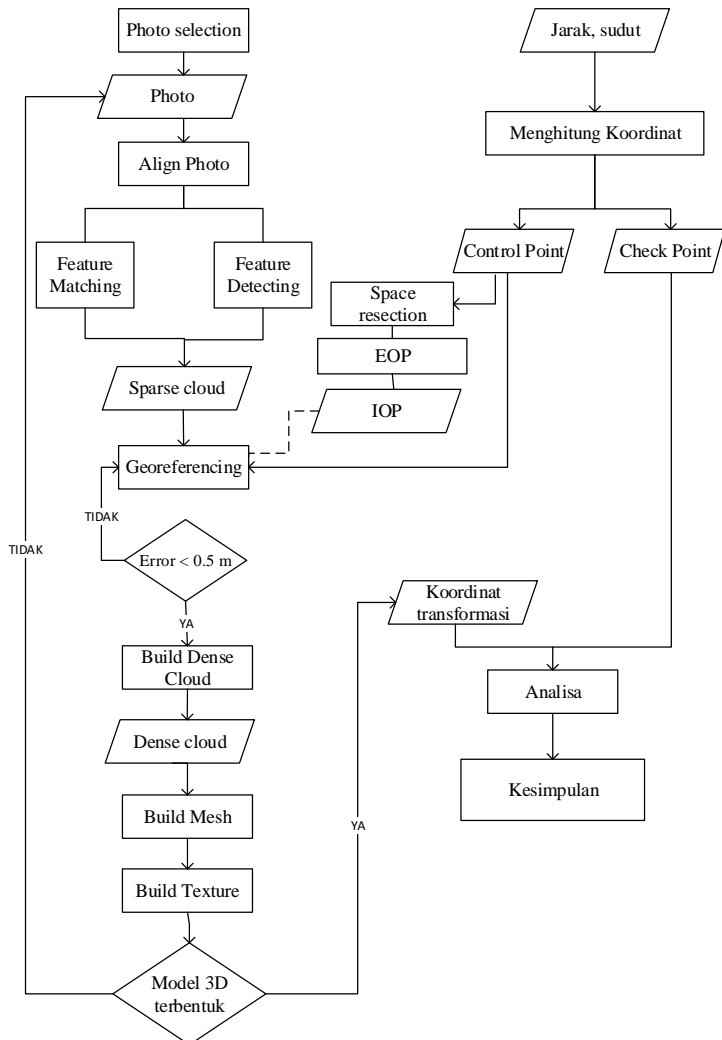
Untuk mendukung studi literature tentang objek, dilakukan orientasi lapangan untuk mempermudah dalam perencanaan penelitian. Pada tahap ini dilakukan perencanaan akan posisi GCP dan ICP, titik lepas landas wahana nirawak serta peralatan pendukung yang dibutuhkan.

4. Pengumpulan Data

Pengumpulan data meliputi :

- a. Foto Candi Wringinlawang dalam berbagai sisi dengan kamera Sony Exmor yang dipasang pada wahana UAV merk DJI Phantom 3
- b. Koordinat (x,y,z) titik kontrol tanah menggunakan *GPS Geodetic*
- c. Koordinat (x,y,z) pada objek didapatkan dari pengukuran dengan *Total Station Reflectorless*.

3.3.2 Tahap Pengolahan Data



Gambar 3. 3 Diagram Alir Pengolahan Data

Pada tahap pengolahan data terdiri atas 2 tahap, yakni pengolahan foto dan koordinat.

1. Pengolahan Foto

Adapun pengolahan foto hingga menjadi sebuah model melalui tahap seperti berikut :

a. Seleksi Foto

Setelah pengambilan foto dari berbagai sisi, langkah selanjutnya dilakukan seleksi foto dengan ketentuan overlap 50-70% dan foto yang memuat gambar candi dengan jelas.

b. *Align Photo*

Setelah pemilihan foto, dilakukan *align photo* dengan tujuan meluruskan foto satu dengan yang lain berdasar posisi kamera. Pada saat *align photo*, terjadi 3 aktivitas yakni :

- *Feature Detecting*
- *Feature matching*
- Kalibrasi Kamera

Deteksi titik dari foto-foto dipengaruhi viewpoint dan pencahayaannya. Dalam deteksinya menggunakan algoritma SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*). Sedangkan untuk mendapatkan IOP (panjang lensa, titik exposure, distorsi radial, distorsi tangensial), algoritma yang digunakan adalah *bundle adjustment self calibration*. Sehingga pada *align photo* dihasilkan titik-titik jarang (*sparse cloud*) dari foto-foto yang bertampalan.

c. Marking

Foto-foto hasil seleksi diberi tanda/mark di pojok-pojok yang mudah dikenali. Tanda ini nantinya diberi koordinat sebagai titik kontrol saat georeferencing

model. Diupayakan satu foto memiliki 3 titik penanda yang bertampalan dengan foto yang lain.

d. Masking

Dengan tujuan membuat model terbentuk efisien, masking dilakukan sebagai tahap filtering agar prosesing lebih fokus pada objek candi. Masking dilakukan jika ada hal yang mengganggu foto seperti adanya objek bergerak, langit, dsb.

e. Pemberian Koordinat Kontrol

Koordinat titik kontrol yang sudah dihitung sebelumnya diinputkan ke model 3D sebagai acuan georeferencing.

f. *Build Dense Cloud*

Setelah itu membentuk *dense cloud* yang merupakan titik-titik yang lebih detail daripada yang dihasilkan di tahap *align photo*. Proses pembentukan dense cloud ini dibentuk dari sekumpulan titik tinggi dengan jumlah ribuan hingga jutaan yang nantinya akan menghasilkan model 3D.

g. *Build Mesh*

Setelah dibentuk *dense cloud*, langkah selanjutnya adalah membentuk jaring. Jaring/mesh dibentuk dari penarikan garis pada titik-titik dense cloud. Sehingga bentuk geometrik 3D objek sudah terbentuk oleh jaringan segitiga (TIN).

h. Build Texture

Pemberian texture merupakan tahap akhir dalam pembentukan model 3D. Proses ini merupakan pemberian tekstur objek sesuai foto asli.

2. Pengolahan koordinat

a. Pengolahan data Poligon

Dari 4 titik poligon, ada 2 titik yang diukur dengan GPS Geodetic metode statik dan 2 titik lain yang diikatkan dengan pengukuran Total Station. Setelah itu dihitung perataan poligon tertutup untuk kerangka kontrol horizontal dan vertikalnya.

b. Perhitungan *Tachymetri*

Dengan metode *tachymetri*, koordinat pada objek yang didapatkan digunakan untuk titik cek.

3.3.3 Tahap Akhir

1. Uji Akurasi

Pada tahap ini akan dilakukan uji *probability error* 95% terhadap koordinat pada model 3D dengan titik ICP untuk mengetahui besar pergeserannya. Karena hasil model 3D tergolong LoD 3, toleransi RMSE yang dibolehkan sebesar 0.5 m.

2. Hasil Analisa

Dari uji akurasi, didapatkan besar ketelitian model 3D Candi Wringinlawang yang dihasilkan dengan menghitung *Root Mean Square Error* (RMSE).

3. Pembuatan Laporan

Dibuat laporan yang rinci dan runtut dari latar belakang, teori yang mendasari, metodologi, hasil dan analisa serta kesimpulan yang didapat dari pengerjaan tugas akhir.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

4.1.1 Titik Kontrol dari Pengukuran GPS

Dikarenakan tempat penelitian berupa tempat wisata yang memiliki luas wilayah yang terbatas serta banyak objek dan orang, penempatan titik kontrol tanah diusahakan di tempat yang tidak terhalang objek. Selain itu titik kontrol tanah ditempatkan di lokasi yang tidak sering dilewati orang atau kendaraan.

Titik kontrol yang digunakan dalam penelitian ini berjumlah 8 buah, 4 titik kontrol tanah dan 4 titik di badan candi. Metode yang digunakan adalah poligon tertutup dimana memerlukan 2 titik yang telah diketahui koordinatnya untuk perhitungannya. Untuk itu dilakukan pengukuran dengan GPS Geodetik yakni GCP 1 dan GCP 2.

Berikut hasil pengukuran titik kontrol menggunakan GPS Geodetic :

Tabel 4. 1. Hasil Pengukuran GPS Geodetik

Nama Titik	X (m)	Y (m)	Z (m)
GCP 1	653443.373	9166100.264	71.125
GCP 2	653482.558	9166112.998	71.555

(sumber : pengukuran lapangan 2017)

Dari pengukuran GPS mendapatkan besar RMSE horizontal 0.003 m dan RMSE vertikal 0.005 m.

4.1.2 Titik Kontrol dari Pengukuran Total Station

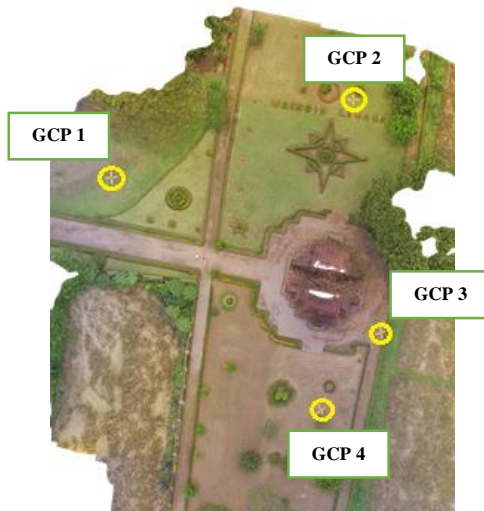
Setelah mendapatkan titik GCP 1 dan GCP 2 (pada tabel 4.1), dilakukan perhitungan poligon tertutup (detail perhitungan terlampir) untuk titik kontrol tanah lainnya.

Berikut koordinat hasil perhitungan poligon tertutup :

Tabel 4. 2 Koordinat Poligon dari Total Station

Nama Titik	X (m)	Y (m)	Z (m)
GCP 1	653443.373	9166100.264	71.125
GCP 2	653482.558	9166112.998	71.555
GCP3	653487.170	9166075.060	71.611
GCP4	653477.437	9166062.339	71.592

(sumber : pengukuran lapangan 2017)



Gambar 4. 1 Peta Persebaran GCP

Titik Kontrol Candi didapatkan dari pengukuran dengan Total Station (detail perhitungan terlampir). Berikut koordinat titik kontrol pada candi :

Tabel 4. 3 Tabel Titik Kontrol Pada Candi

No	Nama Titik	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	DPN1	653477.410	9166085.060	86.783
2	DPN9	653472.753	9166086.042	75.077
3	KR4	653480.388	9166079.552	80.845
4	KR9	653481.240	9166084.315	80.808

(sumber : pengukuran lapangan 2017)



Gambar 4. 2 Persebaran titik kontrol pada candi

4.1.3 Kalibrasi Kamera

Kalibrasi kamera pada penelitian ini menggunakan algorithm bundle Adjustment self calibration.

$$x_a - x_o + \Delta x = -f \frac{(r_{11}(X_A - X_L) + r_{21}(Y_A - Y_L) + r_{31}(Z_A - Z_L))}{(r_{13}(X_A - X_L) + r_{23}(Y_A - Y_L) + r_{33}(Z_A - Z_L))}$$

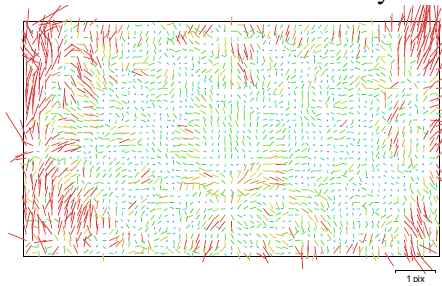
$$y_a - y_o + \Delta y = -f \frac{(r_{12}(X_A - X_L) + r_{22}(Y_A - Y_L) + r_{23}(Z_A - Z_L))}{(r_{13}(X_A - X_L) + r_{23}(Y_A - Y_L) + r_{33}(Z_A - Z_L))}$$

Dimana :

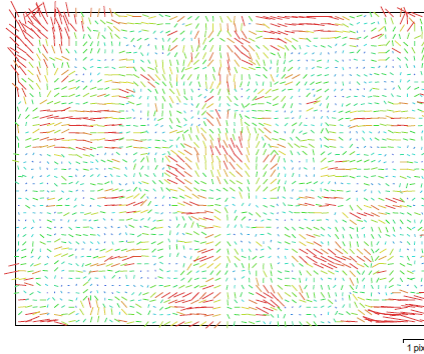
Δx , Δy merupakan kesalahan sistematik dari gambar yang umumnya berupa fungsi dari koordinat foto bertujuan untuk menghasilkan distorsi lensa khususnya di kamera digital.

Pada penelitian ini foto yang diambil menggunakan wahana quadcopter DJI Phantom 3 memiliki ukuran yang berbeda yakni 4000x2250 pix dan 4000x3000 pix. Untuk gambar ukuran 4000x2250 pix merupakan foto miring sedangkan ukuran 4000x3000 pix merupakan foto tegak.

Berikut hasil kalibrasi kamera sony Exmor :



(a)



(b)

Gambar 4. 3 Arah distorsi lensa

Ket : a = distorsi dalam foto miring, b= distorsi dalam foto tegak.
Dimana garis merah-hijau-biru menunjukkan tingkat distorsi tinggi ke rendah.

Tabel 4. 4 Hasil Kalibrasi Kamera

Jenis Foto	Foto Miring	Foto Tegak
Ukuran foto	4000x2250 pix	4000x3000 pix
F	3.961 mm	3.55 mm
Xo	3.396 mm	3.147 mm
Yo	1.867 mm	2.293 mm
k1	0.00000442	-0.0000005
k2	-0.00010448	-0.0000444
k3	0.00020151	0.0000849
p1	-0.00000122	-0.0000024
p2	-0.00000025	0.0000044

4.1.4 Koordinat ICP dari pengukuran lapangan

Sama halnya dengan pengukuran kerangka kontrol, alat yang digunakan dalam pengukuran ini adalah total station *reflectorless*. Perhitungan koordinat menggunakan metode *Tachymetri* (detail perhitungan terlampir). Posisi titik cek dipilih berdasar pertimbangan di bagian yang tidak rusak dan mudah terjangkau saat pengambilan data.

Tabel 4. 5 Tabel Koordinat ICP dari lapangan

No	Nama Titik	Pengukuran di Lapangan		
		X (m)	Y (m)	Z (m)
1	DPN2	653477.946	9166086.592	86.941
2	DPN3	653476.771	9166081.786	86.878
3	DPN4	653476.712	9166080.165	86.944
4	DPN5	653475.436	9166085.449	80.813
5	DPN8	653474.798	9166080.562	80.885
6	DPN10	653472.053	9166082.615	75.086
7	DPN12	653474.694	9166078.828	82.093
8	DPN14	653474.513	9166088.253	72.610
9	KR1	653478.196	9166079.876	87.005

Lanjutan tabel 4.5

No	Nama Titik	Pengukuran di Lapangan		
		X (m)	Y (m)	Z (m)
10	KR2	653478.283	9166077.858	80.952
11	KR3	653475.845	9166078.158	80.872
12	KR5	653481.631	9166078.171	72.635
13	KR6	653480.247	9166076.839	72.643
14	BKLG3	653481.646	9166084.247	76.706
15	BKLG5	653481.612	9166078.121	75.155
16	BKLG6	653483.334	9166086.562	75.127
17	KNN2	653479.477	9166086.277	87.004
18	KNN3	653480.297	9166088.289	80.814
19	KNN4	653477.815	9166088.770	80.820
20	KNN5	653481.483	9166085.746	80.815
21	KNN6	653483.214	9166086.517	72.632
22	KNN7	653482.177	9166088.165	73.140

(sumber : Pengukuran Lapangan, 2017)

4.1.5 Koordinat ICP pada model

Koordinat ICP pada model didapatkan setelah proses georeference. Berikut koordinat ICP pada model :

Tabel 4. 6 Koordinat ICP pada model

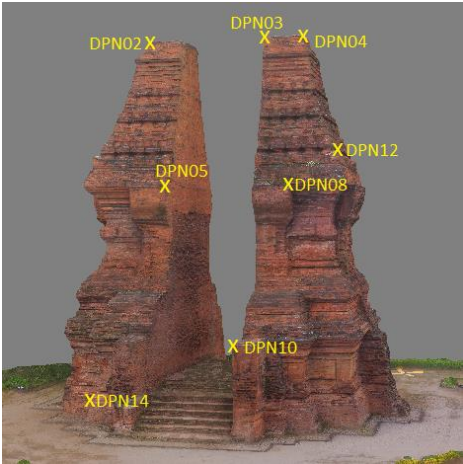
No	Nama Titik	Model 3D		
		X (m)	Y (m)	Z (m)
1	DPN2	653477.954	9166086.628	86.883
2	DPN3	653476.770	9166081.794	86.841
3	DPN4	653476.718	9166080.159	86.909
4	DPN5	653475.431	9166085.451	80.799
5	DPN8	653474.647	9166080.651	80.837
6	DPN10	653472.016	9166082.596	75.115
7	DPN12	653474.693	9166078.796	82.095
8	DPN14	653474.553	9166088.240	72.636

Lanjutan tabel 4.6

No	Nama Titik	Model 3D		
		X (m)	Y (m)	Z(m)
9	KR1	653478.192	9166079.888	86.976
10	KR2	653478.270	9166077.839	80.861
11	KR3	653475.831	9166078.101	80.862
12	KR5	653481.637	9166078.119	72.706
13	KR6	653480.237	9166076.784	72.716
14	BKLG3	653481.671	9166084.264	76.719
15	BKLG5	653481.638	9166078.102	75.075
16	BKLG6	653483.278	9166086.618	75.035
17	KNN2	653479.516	9166086.338	86.947
18	KNN3	653480.309	9166088.395	80.795
19	KNN4	653477.848	9166088.859	80.796
20	KNN5	653481.527	9166085.795	80.785
21	KNN6	653483.258	9166086.525	72.669
22	KNN7	653482.213	9166088.150	73.163



(1)



(2)



(3)



(4)

Gambar 4. 4 Persebaran Koordinat ICP

(1) tampak barat; (2) tampak timur; (3) tampak selatan; (4) tampak utara

4.1.6 Foto Objek

Foto objek yang digunakan dalam pengolahan ini sebanyak 155 buah foto. Foto yang diambil meliputi foto tegak dan foto miring. Berikut ini sampel foto objek Candi Wringinlawang yang diambil dengan kamera Sony EXMOR dibantu wahana drone DJI Phantom 3 :



(1)



(2)



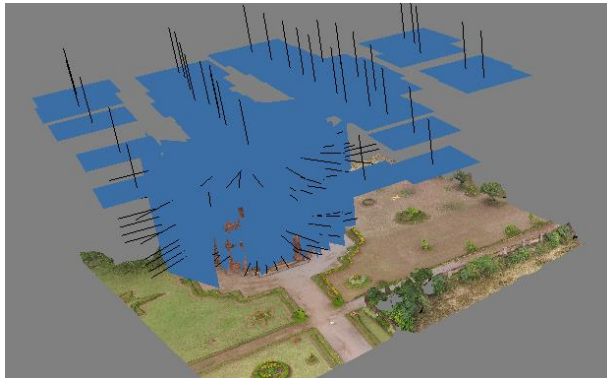
Gambar 4. 5 Sampel Pengambilan Foto

Ket : (1) foto tegak candi bagian atas ; (2) foto miring candi bagian atas; (3) foto miring candi bagian bawah; (4) foto miring candi bagian tengah

4.1.7 Model 3D

Berikut adalah hasil model 3D Candi Wringinlawang dengan SfM :

1. Model 3D dibentuk dari 155 buah foto.



Gambar 4. 6 Sisi pengambilan Gambar

2. Pada tahap alignment photo menghasilkan 465,487 buah titik.



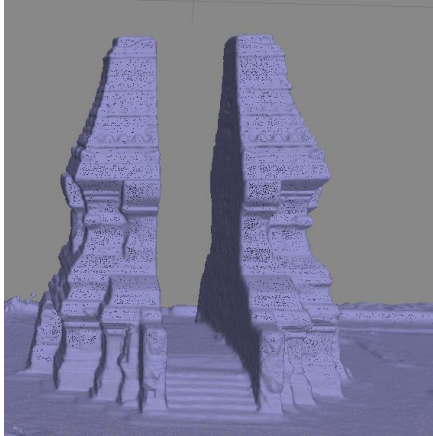
Gambar 4. 7 Hasil Alignment Photo

3. Tahap Build Dense Cloud dengan level medium menghasilkan 5,996,415 buah titik.



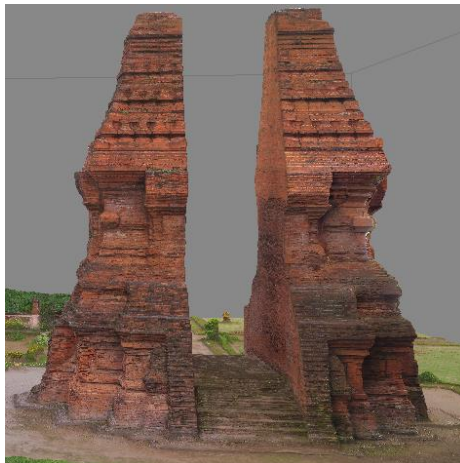
Gambar 4. 8 Hasil Build Dense Cloud

4. Terbentuk 1,155,740 garis dan 580,147 segitiga pada tahap pembentukan jaring (mesh).



Gambar 4. 9 Hasil Build Mesh

5. Tekstur model Candi terbentuk dari mozaik foto-foto.



Gambar 4. 10 Hasil Texture

4.2 Analisa

4.2.1 Poligon

Dari perhitungan poligon, didapatkan besar kesalahan poligon seperti berikut:

Tabel 4. 7 Kesalahan pada poligon

F _x	0.020 m
F _y	-0.012 m
F _h	0.003 m
Kesalahan Penutup Sudut	0°0'5"
Kesalahan Linear	0.00014

(sumber : pengukuran lapangan)

Total Station yang digunakan memiliki bacaan terkecil 1'' dan toleransi yang diperbolehkan sebesar $1''\sqrt{n} = 1''\sqrt{4} = 2''$. Sehingga kesalahan penutup sudut poligon pengukuran tidak masuk toleransi. Hal ini dapat disebabkan karena prisma yang digunakan sebagai target tidak tegak lurus dengan patok yang terpasang.

Untuk kesalahan linier, toleransi yang diperbolehkan sebesar 1/2500 (atau 0.0004). Pada penelitian ini memiliki kesalahan linier 0.00014 atau 1/714.285, sehingga masih masuk batas toleransi.

4.2.2 Kalibrasi Kamera

Seperti yang dilihat pada tabel 4.3 tentang hasil kalibrasi kamera dapat dianalisa seperti berikut :

- Kalibrasi kamera memiliki kesalahan acak seperti yang dapat dilihat pada gambar 3.4. Garis merah menyebar di pojok foto

serta ada yang berada di tengah foto, hal ini menunjukkan jika distorsi di foto tidak seragam.

- Sensor kamera Sony Exmor memiliki ukuran sebesar 6.17x4.56 mm. Sehingga dapat dianalisa sebagai berikut :

Tabel 4. 8 Tabel analisa kalibrasi kamera

Titik	Titik Pusat			Selisih	
	Sensor (mm)	Foto Miring (mm)	Foto Tegak (mm)	Foto Miring (mm)	Foto Tegak (mm)
xo	3.085	3.396	3.147	-0.311	-0.062
yo	2.28	1.867	2.293	0.413	-0.013
f	3.61	3.961	3.55	-0.325	0.096

Untuk menganalisisnya digunakan uji t-student menggunakan koefisien $t = 6.31$ karena $n=2$ dan $dof=1$ sehingga hasilnya seperti berikut :

Tabel 4. 9 Tabel uji-t hasil kalibrasi (xo, yo, f)

Titik	Selisih		Batas bawah (mm)	Batas atas (mm)	Ket
	Foto Miring (mm)	Foto Tegak (mm)			
xo	-0.311	0.062	-0.972	0.5991	diterima
yo	0.413	-0.013	-1.144	1.5440	diterima
f	-0.325	0.096	-1.442	1.2132	diterima

- Pergeseran pada foto miring lebih banyak daripada foto tegak. Hal tersebut dapat disebabkan akan rasio foto miring 16:9 yang merupakan potongan dari foto tegak yang memiliki rasio 4:3.
- Kamera yang digunakan yakni Sony Exmor yang dibawa copter tidak stabil.
- Kamera yang digunakan bukan kamera metrik, sehingga tidak ada ketentuan mengenai panjang fokus dan besar distorsi.

- Cara pengambilan foto yang berbeda yakni foto tegak dan foto miring (untuk merekam badan candi).

4.2.3 Model 3D

a. Bentuk

Model 3D Candi Wringinlawang terbentuk dari 155 buah foto yang didapatkan dari kamera Sony Exmor yang dibantu dengan wahana DJI Phantom 3. Pengambilan foto dilakukan pada pukul 11.00 WIB dengan cuaca sedikit mendung sehingga ada beberapa bagian yang gelap.

Selain karena faktor cuaca, pembentukan model yang belum mendetail di beberapa bagian disebabkan karena adanya faktor cahaya yang kurang. Salah satu bagian yang terdampak cahaya kurang sehingga menjadi kurang detail yakni bagian timur laut, dimana terdapat pohon beringin di sebelahnya.

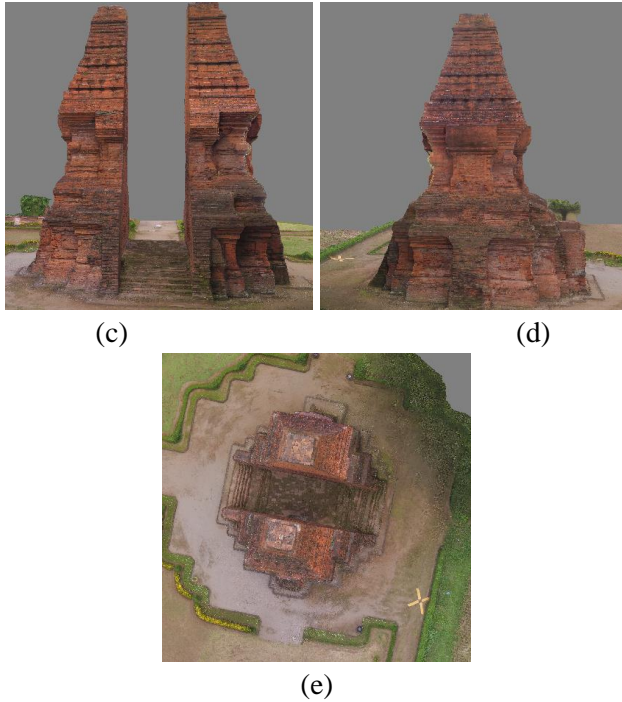
Bentuk Model 3D Candi Wringinlawang dibentuk oleh 465,487 buah sparse cloud, 5,996,415 titik dense cloud, serta 1.155.740 permukaan dan 580,147 vertex.



(a)



(b)



Gambar 4. 11 Model 3D Candi Wringinlawang

Ket : a = tampak timur ; b = tampak utara ; c= tampak barat ; d = tampak selatan

b. Pemberian Marker

Pemberian marker ini berguna sebagai penanda dari titik yang sama antar foto. Penulis mengambil minimal 5 titik dari setiap foto yang bertampalan dengan foto lain. Jumlah mark (tanda) ini juga berguna sebagai penanda GCP dan ICP untuk keperluan analisis ketelitian geometrik. Total pemberian marker pada model 3D Candi Wringinlawang ini sebanyak 87 buah.



Gambar 4. 12 Contoh pemberian marker pada objek

c. Masking

Masking sebagai salah satu cara untuk filtering model. Hal-hal yang difilter umumnya benda yang bergerak seperti orang, mobil, langit agar proses feature detecting dan feature matching lebih fokus pada objek sehingga tidak memerlukan waktu lebih banyak.





Gambar 4. 13 Proses Masking

4.2.4 Analisa Ketelitian Geometrik

Analisa dilakukan dengan 22 titik ICP yang diukur di lapangan dan tersebar pada model 3D seperti berikut:

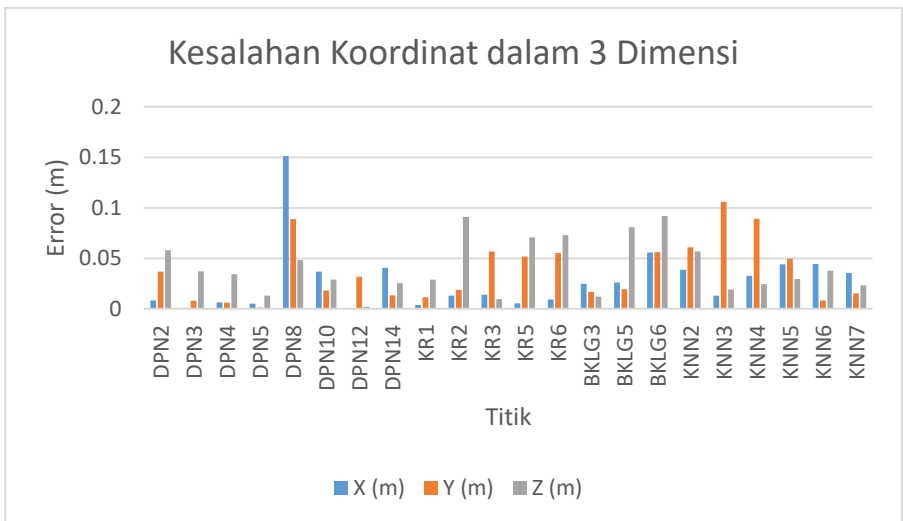
Tabel 4. 10 Tabel Kesalahan Koordinat ICP lapangan dan model

No	Nama Titik	Error		
		X (m)	Y (m)	Z (m)
1	DPN2	0.008360	0.036838	0.058071
2	DPN3	0.000967	0.008133	0.037283
3	DPN4	0.006509	0.006091	0.034274
4	DPN5	0.005344	0.001452	0.013276
5	DPN8	0.151293	0.088891	0.048174
6	DPN10	0.036745	0.018212	0.029128
7	DPN12	0.000916	0.031806	0.001907
8	DPN14	0.040840	0.013328	0.025343
9	KR1	0.003911	0.011483	0.028961
10	KR2	0.012998	0.018893	0.091028
11	KR3	0.014067	0.056807	0.009680
12	KR5	0.005686	0.051881	0.070779
13	KR6	0.009397	0.055216	0.072916
14	BKLG3	0.024719	0.017063	0.012090
15	BKLG5	0.026087	0.019363	0.081046

Lanjutan tabel 4.10

No	Nama Titik	Error		
		X (m)	Y (m)	Z (m)
16	BKLG6	0.055922	0.056106	0.092078
17	KNN2	0.038740	0.060918	0.057011
18	KNN3	0.013002	0.105942	0.019036
19	KNN4	0.032868	0.089048	0.024648
20	KNN5	0.044238	0.049445	0.029621
21	KNN6	0.044536	0.008399	0.037786
22	KNN7	0.035511	0.015233	0.023405

Gambar 4. 14 Grafik Kesalahan Model 3D



4.2.3.1 Koordinat X

Koordinat X memiliki rata-rata kesalahan 0.027 m dengan nilai standar deviasi sebesar 0.032 m. Nilai RMSE dari koordinat X sebesar 0.042 m.

Untuk mengevaluasi kesalahan, dilakukan uji *error probability* dengan tingkat kepercayaan 95% dimana nilai $E_{95}=0.063$ m. Sehingga nilai diluar selang kepercayaan -0.035 hingga 0.091 m tidak diterima.

Berikut kesalahan pada koordinat X :

Tabel 4. 11 Tabel Uji Error Koordinat X

No	Nama Titik	Pengukuran Lapangan	Model 3D	Error (m)	Ket
		X (m)	X (m)		
1	DPN2	653477.946	653477.954	0.0083	diterima
2	DPN3	653476.771	653476.770	0.0009	diterima
3	DPN4	653476.711	653476.718	0.0065	diterima
4	DPN5	653475.436	653475.431	0.0053	diterima
5	DPN8	653474.798	653474.647	0.1513	tidak diterima
6	DPN10	653472.053	653472.016	0.0367	diterima
7	DPN12	653474.694	653474.693	0.0009	diterima
8	DPN14	653474.513	653474.553	0.0408	diterima
9	KR1	653478.196	653478.192	0.0039	diterima
10	KR2	653478.283	653478.270	0.0129	diterima
11	KR3	653475.845	653475.831	0.0141	diterima
12	KR5	653481.631	653481.637	0.0057	diterima
13	KR6	653480.246	653480.237	0.0093	diterima
14	BKLG3	653481.646	653481.671	0.0247	diterima
15	BKLG5	653481.612	653481.638	0.0261	diterima
16	BKLG6	653483.334	653483.278	0.0559	diterima
17	KNN2	653479.477	653479.516	0.0387	diterima

Lanjutan tabel 4.11

No	Nama Titik	Pengukuran Lapangan	Model 3D	Error (m)	Ket
		X (m)	X (m)		
18	KNN3	653480.296	653480.309	0.0130	diterima
19	KNN4	653477.815	653477.848	0.0328	diterima
20	KNN5	653481.483	653481.527	0.0442	diterima
21	KNN6	653483.214	653483.258	0.0445	diterima
22	KNN7	653482.177	653482.213	0.0355	diterima

Dari tabel di atas, titik DPN 8 tidak diterima dalam selang kepercayaan -0.035 sampai 0.091 m. Sehingga terdapat 21 data yang diterima atau 95.45% dari keseluruhan data.

4.2.3.2 Koordinat Y

Koordinat Y memiliki rata-rata kesalahan 0.037 m dengan nilai standar deviasi sebesar 0.030 m. Nilai RMSE dari koordinat Y sebesar 0.047 m.

Untuk mengevaluasi kesalahan, dilakukan uji *error probability* dengan tingkat kepercayaan 95% dimana nilai $E_{95}=0.059$ m. Sehingga nilai diluar selang kepercayaan -0.021 m hingga 0.96 m tidak diterima.

Berikut kesalahan pada koordinat Y :

Tabel 4. 12 Tabel Uji Error Koordinat Y

No	Nama Titik	Pengukuran di Lapangan	Model 3D	Error (m)	Ket
		Y (m)	Y (m)		
1	DPN2	9166086.592	9166086.628	0.0368	diterima
2	DPN3	9166081.786	9166081.794	0.0081	diterima
3	DPN4	9166080.165	9166080.159	0.0061	diterima

Lanjutan tabel 4.12

No	Nama Titik	Pengukuran di Lapangan	Model 3D	Error (m)	Ket
		Y (m)	Y(m)		
4	DPN5	9166085.449	9166085.451	0.0014	diterima
5	DPN8	9166080.562	9166080.651	0.0889	diterima
6	DPN10	9166082.615	9166082.596	0.0182	diterima
7	DPN12	9166078.828	9166078.796	0.0318	diterima
8	DPN14	9166088.253	9166088.240	0.0133	diterima
9	KR1	9166079.876	9166079.888	0.0115	diterima
10	KR2	9166077.858	9166077.839	0.0189	diterima
11	KR3	9166078.158	9166078.101	0.0568	diterima
12	KR5	9166078.171	9166078.119	0.0519	diterima
13	KR6	9166076.839	9166076.784	0.0552	diterima
14	BKLG3	9166084.247	9166084.264	0.0171	diterima
15	BKLG5	9166078.121	9166078.102	0.0193	diterima
16	BKLG6	9166086.562	9166086.618	0.0561	diterima
17	KNN2	9166086.277	9166086.338	0.0609	diterima
18	KNN3	9166088.289	9166088.395	0.1059	Tidak diterima
19	KNN4	9166088.770	9166088.859	0.0890	diterima
20	KNN5	9166085.746	9166085.795	0.0494	diterima
21	KNN6	9166086.517	9166086.525	0.0084	diterima
22	KNN7	9166088.165	9166088.150	0.0152	diterima

Dari tabel di atas, titik KNN 3 tidak diterima dalam selang kepercayaan -0.021 hingga 0.096 m. Sehingga terdapat 21 data yang diterima atau 95.45% dari keseluruhan data.

4.2.3.3 Koordinat Z

Koordinat Z memiliki rata-rata kesalahan 0.026 m dengan nilai standar deviasi sebesar 0.026 m. Nilai RMSE dari koordinat Y sebesar 0.048 m.

Untuk mengevaluasi kesalahan, dilakukan uji *error probability* dengan tingkat kepercayaan 95% dimana nilai $E_{95}=0.052$ m. Sehingga nilai diluar selang kepercayaan -0.018 hingga 0.093 m tidak diterima.

Berikut kesalahan pada koordinat Z :

Tabel 4. 13 Tabel Error Koordinat Z

No	Nama Titik	Pengukuran di Lapangan	Model 3D	Error (m)	Ket
		Z (m)	Z (m)		
1	DPN2	86.941	86.883	0.058	diterima
4	DPN5	80.813	80.799	0.013	diterima
5	DPN8	80.885	80.837	0.048	diterima
6	DPN10	75.086	75.115	0.029	diterima
7	DPN12	82.093	82.095	0.002	diterima
8	DPN14	72.610	72.636	0.025	diterima
9	KR1	87.005	86.976	0.029	diterima
10	KR2	80.952	80.861	0.091	diterima
11	KR3	80.872	80.862	0.009	diterima
12	KR5	72.635	72.705	0.071	diterima
13	KR6	72.643	72.716	0.073	diterima
14	BKLG3	76.707	76.719	0.012	diterima
15	BKLG5	75.155	75.075	0.081	diterima
16	BKLG6	75.127	75.035	0.092	diterima
17	KNN2	87.004	86.947	0.057	diterima
18	KNN3	80.814	80.794	0.019	diterima
19	KNN4	80.820	80.795	0.024	diterima

Lanjutan tabel 4.12

No	Nama Titik	Pengukuran di Lapangan	Model 3D	Error (m)	Ket
		Z (m)	Z (m)		
20	KNN5	80.815	80.785	0.029	diterima
21	KNN6	72.632	72.669	0.037	diterima
22	KNN7	73.140	73.164	0.023	diterima

Dari tabel di atas, terdapat 22 data yang diterima dari keseluruhan data.

4.2.5 Level Of Detail (LoD)

Model 3D Candi Wringinlawang yang dihasilkan memiliki level of Detail (LoD) orde 3 dikarenakan hal berikut :

1. Skala Model yang dihasilkan berupa penampakan exterior bangunan (seperti pada gambar 4.10).
2. Akurasi posisi dan tinggi yang digambarkan besar *Root Mean Square* (RMSE) masuk batas toleransi LoD 3 sebesar 0.5 m.

Seperti yang terdapat pada 4.2.4, besar Root Mean Square Error (RMSE) seperti berikut :

- RMSE_x = 0.042 m
 - RMSE_y = 0.047 m
 - RMSE_z = 0.048 m
3. Struktur yang terbentuk sesuai dengan objek sesungguhnya (pada gambar 4.10).

4.2.6 Kesalahan 3D

Seperti pada yang telah dijelaskan pada sub bab 2.5.2 (Uji ketelitian poin 4) tentang kesalahan 3D, didapatkan kesalahan 3D per titik sebagai berikut :

Tabel 4. 14 Tabel Kesalahan titik dalam 3D

No	Nama Titik	Selisih			Error 3D (m)
		X (m)	Y (m)	Z (m)	
1	DPN 2	0.00836	0.03684	-0.05807	0.06927
2	DPN 3	-0.00097	0.00813	-0.03728	0.03817
3	DPN4	0.00651	-0.00609	-0.03427	0.03541
4	DPN 5	-0.00534	0.00145	-0.01328	0.01438
5	DPN 8	-0.15129	0.08889	-0.04817	0.18197
6	DPN 10	-0.03674	-0.01821	0.02913	0.05030
7	DPN 12	-0.00092	-0.03181	0.00191	0.03187
8	DPN 14	0.04084	-0.01333	0.02534	0.04988
9	KR1	-0.00391	0.01148	-0.02896	0.03139
10	KR2	-0.01300	-0.01889	-0.09103	0.09387
11	KR3	-0.01407	-0.05681	-0.00968	0.05932
12	KR5	0.00568	-0.05188	0.07078	0.08794
13	KR6	-0.00940	-0.05522	0.07292	0.09194
14	BKLG3	0.02472	0.01706	0.01209	0.03238
15	BKLG5	0.02609	-0.01936	-0.08105	0.08731
16	BKLG6	-0.05592	0.05611	-0.09208	0.12146
17	KNN2	0.03874	0.06092	-0.05701	0.09199
18	KNN3	0.01300	0.10594	-0.01904	0.10842
19	KNN4	0.03287	0.08905	-0.02465	0.09807
20	KNN5	0.04424	0.04944	-0.02962	0.07265
21	KNN6	0.04454	0.00839	0.03779	0.05900
22	KNN7	0.03551	-0.01523	0.02340	0.04517

Dari tabel 4.14 didapatkan jika kesalahan terbesar ada pada titik DPN 8 dan terkecil pada titik DPN 5. Hal itu dapat disebabkan karena cagar budaya tidak bisa diberi marker sehingga besar

kemungkinan jika terjadi salah pembidikan titik saat pengambilan data atau penempatan marker saat pengolahan model.

4.2.7 Hubungan ketelitian dan skala

Sesuai dengan Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial no 15 tahun 2014, Badan Informasi Geospasial memiliki ketentuan akan ketelitian geometri peta RBI. Dimana besar skala peta didapatkan dari ketelitian yang dalam hal ini dari perhitungan CE90.

$$RMSE_{hz} = \sqrt{(RMSE_x)^2 + (RMSE_y)^2} = 0.063493066 \text{ m}$$

Sehingga.

$CE90 = 1.5175 \times RMSE_{hz} = 0.0963 \text{ m}$ sehingga didapatkan skala horizontal 1:240

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Model 3D Candi Wringinlawang termasuk LoD orde 3 yang terbentuk dari 155 buah foto dan terdiri atas 465,487 buah *sparse cloud*, 5,996,415 titik *dense cloud*, serta 1,155,740 *faces* dan 580,147 *vertex* dengan *Root Mean Square Error (RMSE)* seperti berikut:
 - Koordinat X = 0.042 m
 - Koordinat Y = 0.047 m
 - Koordinat Z = 0.048 m
2. Ketelitian model yang dihasilkan seperti berikut :
 - Koordinat X memiliki nilai standar deviasi sebesar 0.032 m dan terdapat 1 data yang berpeluang error setelah dilakukan uji probabilitas error dengan selang kepercayaan 95%.
 - Koordinat Y memiliki nilai standar deviasi sebesar 0.030 m dan terdapat 1 data yang berpeluang error setelah dilakukan uji probabilitas error dengan selang kepercayaan 95%.
 - Koordinat Z memiliki nilai standar deviasi sebesar 0.026 m dan tidak terdapat data yang berpeluang error setelah dilakukan uji probabilitas error dengan selang kepercayaan 95%.

- Kesalahan titik pada bidang 3D terbesar ada pada titik DPN 8
- Skala horizontal yang dapat membentuk model adalah 1:240

5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya adalah :

1. Melakukan *pre-calibrated* agar mengetahui perubahan besar kalibrasi kamera sebelum dilakukan algoritma bundle adjustment.
2. Tidak mengambil ICP di bagian yang rusak, sehingga berpotensi membuat kesalahannya semakin besar.
3. Mengambil sampel titik ICP lebih dari 1 untuk menghindari adanya kesalahan saat membidik.
4. Menggunakan perataan jaring untuk titik kontrol agar mengerti perambatan kesalahan dari titik ikat ke titik yang dicari

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. 2008. Chapter X. Digital Image Processing. Taiwan: National Central University.
- Bayuaji, R. A., Suprayogi, A., & Sasmito, B. 2015. Aplikasi Fotogrametri Jarak Dekat untuk Pemodelan 3D Gereja Blenduk Semarang. Jurnal Geodesi Undip.
- BIG. 2014. Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 Tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar. Bogor: BIG.
- Biljecki, F. 2013. The Concept of Level of Detail. Netherlands: TU Delft.
- BSN. 2002. Jaring Kontrol Horizontal. Jakarta : Badan Standar Nasional.
- Cipolla, R. 2008. Chapter 13 : Structure From Motion. Diakses dari University of Cambridge: [<http://mi.eng.cam.ac.uk/~cipolla/publications/contributionToEditedBook/2008-SFM-chapters.pdf>] pada 13 Desember 2016 pukul 18.30.
- Disura. 2014. Candi Wringinlawang. Diakses dari 3D Warehouse: [<https://3dwarehouse.sketchup.com/model>] pada tanggal 26 November 2016 pukul 17.00.

DJI. 2016. User Manual : DJI Phantom 3. DJI.

Fan, H., & Meng, L. 2009. Automatic Derivation of Different Levels of Detail for 3d Buildings Modeled by City-Gml. Munich: International Graduate School of Science and Engineering Department of Cartography, Technische Universität München Arcisstr.

Fraser, C. 2015. Advances in Close Range Photogrammetry. Wichmann/VDE Verlag, Belin & Offenbach, 257-268.

Ghilani, C. D., & Wolf, P. R. 2006. Adjustment Computations Spatial Data Analysis. Canada: John Wiley & Sons Inc.

Girod, B. 2013. Digital Image Processing. California: Stanford University.

Guerrero. 2011. A Comparative Study of Three Image Matching Algorithms : Sift, Surf, and Fast. Logan: Master of Science in Civil and Environmental Engineering, Utah State University.

Hanifa, N. R. 2007. Studi Penggunaan Kamera Digital Low-Cost Non Metric Auto Focus untuk Pemantauan Deformasi. Bandung: ITB.

Harintaka, Subaryono, Susanto, A., & Hartono. 2009. Pemodelan Ketidakstabilan Kamera Dan Gerakan Pesawat Pada Saat Pemotretan Foto Udara Format Kecil. Yogyakarta: Universitas Gajahmada.

- Hidayat, H., & Cahyono, A. B. 2015. 3D Reconstruction of Singosari Temple Using Terrestrial Images and Structure From Motion Algorithm. ICOIRS 2015.
- Jacobsen, K. 2003. Block Adjustment. Hannover: Institute for Photogrammetry and Surveying Engineering.
- Javernick, L., Brasington, J., & Caruso, B. 2014. Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology*, 166-182.
- Kurniasih, D. 2015. Kajian Historis Candi Wringin Lawang di Desa Jatipasar Kecamatan Trowulan Kabupaten Mojokerto sebagai Pintu Masuk Sebuah Komplek Bangunan. Kediri: Program Studi Pendidikan Sejarah Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Nusantara PGRI.
- Lin, J.-Y., & Chio, S.-H. 2012. The Accuracy Influence of Different Camera Calibration Conditions to Bundle Adjustment of Close Range Images. The 33rd Asian Conference on Remote Sensing. Pattaya : ASRS.
- Psumansky, Alexy. 2014. Ground Control Reporting. Diakses dari [www.agisoft.com/forum] pada 14 Juli 2017 pukul 11.45.
- Perpusnas RI. 2014. Candi Wringinlawang. Diakses dari Perpusnas RI: [http://candi.perpusnas.go.id/temples/deskripsi-jawa_timur-candi_wringinlawang] pada 20 November 2016 pukul 13.00.

- Putra, A. R., & Handayani, H. H. 2016. 3D Modelling Using Structure From Motion Anda Terrestrial Laser Scanning (Case Study : Singosari Temple, Malang). Surabaya: Geomatics Engineering Departement, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Septifa, I. 2013. Pengaruh Jarak Pemotretan Terhadap Ketelitian Koordinat Titik Cek Pada Teknik Fotogrametri Jarak Dekat. Yogyakarta: Universitas Gajahmada.
- Snavely, N. 2010. Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections. Proceedings of the IEEE.
- Suwardhi, D., Menna, F., Remondino, F., Hanke, K., & Akmalia, R. 2015. Digital 3D Borobudur : Integration of 3D Surveying and Modeling Techniques. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-5/W7.
- Szeliski, R. 2010. Computer Vision: Algorithms and Applications. Berlin: Springer.
- Wardani, L. K., Sitindjak, R. H., & Sari, S. M. 2015. Estetika Ragam Hias Candi Bentar dan Panduraksa di Jawa Timur. Konferensi Nasional Pengkajian Seni (Arts and Beyond) (pp. 325-339). Yogyakarta: Program Studi Pengkajian Seni Pertunjukan dan Seni Rupa, Sekolah Pascasarjana, Universitas Gadjah Mada.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. 2012. 'Structure-from-motion'

photogrammetry : a low cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 300-314.

Wijayanto, B. M. 2016. *Pemodelan Waduk Bajulmati dengan Wahana Udara tanpa Awak Aibotix*. Yogyakarta: Universitas Gajahmada.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Lampiran 1. Perhitungan Poligon

Posisi Alat	Target	Sudut horizontal	sudut vertikal	sd	tinggi prisma	tinggi alat	d	ΔH	azimut	dcos	dsin	fx	fy	fh	X	Y	Z
1	2	0	89.648	41.214	1.335	1.548	41.213	0.466159	251.997	-12.737	-39.196	0.006	0.0009	0.00094	653443.368	9166100.262	71.125
	4	66.069	89.632	50.950	1.41		50.949	0.465536									
4	1	0	90.654	50.981	1.385	1.5	50.977	-0.46681	138.067	-37.918	34.0621	0.007	-0.004	0.00116	653477.437	9166062.339	71.5917
	3	79.346	90.256	16.016	1.41		16.016	0.018564									
3	4	239.097	90.121	16.018	1.455	1.47	16.018	-0.01886	397.412	12.7222	9.73114	0.002	-0.001	0.00037	653487.17	9166075.06	71.6106
	2	14.746	90.067	38.210	1.45		38.210	-0.02464									
2	3	0	90.059	38.230	1.42	1.485	38.229	0.025151	353.062	37.9451	-4.6175	0.005	-0.003	0.00087	653482.558	9166113.002	71.5869
	1	78.934	90.622	41.217	1.5		41.214	-0.4628									

Lampiran 2. Perhitungan Koordinat pada Candi

Posisi Alat	Target	Sudut Horizontal	Sudut vertikal	Azimuth	SD	D	Jarak Vertikal	X	Y	Z
1	DPN1	42.066	69.271	114.062	39.863	37.282	14.109	653477.410	9166085.060	86.783
	DPN2	39.574	69.007	111.570	39.826	37.182	14.268	653477.946	9166086.592	86.941
	DPN3	46.951	69.588	118.948	40.730	38.173	14.205	653476.771	9166081.786	86.878
	DPN4	49.081	69.869	121.078	41.465	38.932	14.271	653476.712	9166080.165	86.944
	DPN5	42.795	77.023	114.792	36.250	35.324	8.140	653475.436	9166085.449	80.813
	DPN8	50.081	77.517	122.078	37.992	37.094	8.212	653474.798	9166080.562	80.885
	DPN9	43.826	85.788	115.823	32.733	32.645	2.404	653472.753	9166086.042	75.077
	DPN11	36.347	77.360	108.344	37.242	36.339	8.150	653477.860	9166088.825	80.822
	DPN12	52.383	76.062	124.380	39.109	37.957	9.420	653474.694	9166078.828	82.093
	DPN14	39.088	90.107	111.085	33.380	33.379	-0.062	653474.513	9166088.253	72.611
4	KR1	44.414	51.597	2.478	22.399	17.553	13.914	653478.196	9166079.876	87.006
	KR2	45.058	63.172	3.122	17.416	15.541	7.860	653478.283	9166077.858	80.952
	KR3	36.191	63.923	354.254	17.700	15.898	7.780	653475.845	9166078.158	80.872
	KR4	51.666	66.059	9.729	19.108	17.464	7.754	653480.388	9166079.552	80.846

Lanjutan Lampiran 2

Posisi Alat	Target	Sudut Horizontal	Sudut Vertikal	Azimuth	SD	D	Jarak Vertikal	X	Y	Z
4	KR5	56.776	91.597	14.839	16.384	16.377	-0.456	653481.631	9166078.171	72.635
	KR6	52.903	91.738	10.967	14.776	14.769	-0.448	653480.247	9166076.839	72.644
	KR9	51.755	70.914	9.819	23.6	22.302	7.717	653481.240	9166084.315	80.809
3	BKLG3	350.657	71.310	328.982	11.316	10.719	3.626	653481.646	9166084.247	76.707
	BKLG5	320.515	71.891	298.839	6.676	6.345	2.075	653481.612	9166078.121	75.156
	BKLG6	3.230	80.419	341.555	12.296	12.124	2.047	653483.334	9166086.562	75.127
2	KNN2	13.507	62.617	186.576	30.292	26.898	13.932	653479.477	9166086.277	87.004
	KNN3	12.160	72.671	185.229	25.992	24.812	7.742	653480.297	9166088.289	80.814
	KNN4	18.008	72.575	191.077	25.875	24.687	7.748	653477.815	9166088.770	80.820
	KNN5	9.189	74.150	182.258	28.351	27.273	7.743	653481.483	9166085.746	80.815
	KNN6	5.512	90.952	178.581	26.493	26.489	-0.440	653483.214	9166086.517	72.632
	KNN7	7.809	89.842	180.878	24.836	24.836	0.068	653482.177	9166088.165	73.140

Lampiran 3. Surat Ijin Pemanfaatan Cagar Budaya dari BPCB



KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
BALAI PELESTARIAN CAGAR BUDAYA JAWA TIMUR
 Jalan Majapahit No. 141 – 143 Trowulan, Kabupaten Mojokerto 61362
 Telepon : (0321) 495515, Faksimil : (0321) 495515
 Laman : purbakala.jatim@yahoo.com

SURAT IJIN PEMANFAATAN SITUS CAGAR BUDAYA
Nomor : /E20/PG/2017

Kepala Balai Pelestarian Cagar Budaya Jawa Timur memberi ijin kepada :

Nama	: Selfi Naufatunnisa, 3513100049
Asal	: Teknik Geomatika Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Memfaatkan	: Candi Wringin Lawang, Unit Dokumentasi dan Publikasi
Keperluan	: Ijin observasi dan pengumpulan data dalam rangka memenuhi tugas akhir "Pemodelan 3 Dimensi Candi Wringinlawang Menggunakan Metode Structure from Motion untuk Dokumentasi Cagar Budaya".
Waktu	: Februari-April 2017

Dengan persyaratan sebagai berikut :

1. Dalam kegiatan penelitian tersebut harus tetap memperhatikan dan menghormati nilai yang terkandung dalam cagar budaya dan dapat meningkatkan apresiasi masyarakat terhadap cagar budaya, dan/atau meningkatkan ilmu pengetahuan dan/atau teknologi yang berbasis pada nilai-nilai kearifan lokal.
2. Ikut menjaga kebersihan dan kelestarian lingkungan situs dan cagar budaya.
3. Kegiatan dilaksanakan setiap hari kerja (Senin s/d Jumat) pukul 08.00 – 16.00 WIB.
4. Selama kegiatan didampingi oleh petugas dari Balai Pelestarian Cagar Budaya Jawa Timur.
5. **Wajib menyerahkan 1 Eksemplar buku hasil penulisan**

Apabila di dalam pelaksanaan kegiatan yang Saudara lakukan ternyata terdapat penyimpangan dari persyaratan di atas, maka akan diberi sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Demikian surat ijin ini diberikan agar dipergunakan sebagaimana mestinya.

Mojokerto, 10 Februari 2017



Des. Eddy Widodo, M.Si
 NIP. 196202181994031001

Lampiran 4. Form ukur GPS

 <p>Departemen Teknik Geomatika Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER Kampus ITS, Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur. Kode Pos: 60111. Telp. : 031-5939361. Fax. : 031-5939362</p>	NAMA TITIK
	GCP 1
FORMULIR DESKRIPSI TITIK GPS	
<p>Metode Pengukuran: statik-radial Lokasi : Candi Wringinlawang, Ds. Jatipasar, Kec. Trowulan, Kab. Mojokerto, Jawa Timur Waktu Pengamatan: Tanggal: 6 April 2017 / 9.28 – 10.55 Receiver: Topcon, Model: Hiper Pro Antena: Topcon Tinggi Antena: Tegak; 1.25 m</p>	
<p>Uraian Lokasi : Berada di tempat terbuka sebelah timur Candi Wringinlawang</p>	
<p>Kenampakan Menonjol : Di taman</p>	
<p>Jalan ke Lokasi : terbuka</p>	
<p>Transportasi & Akomodasi ke Lokasi : Jalan kaki</p>	
Sketsa Umum	Foto Lokasi
	

 <p>Departemen Teknik Geomatika Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER Kampus ITS, Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur. Kode Pos: 60111. Telp. : 031-5939361. Fax. : 031-5939362</p>	NAMA TITIK
	GCP 2
FORMULIR DESKRIPSI TITIK GPS	
<p>Metode Pengukuran: statik-radial Lokasi : Candi Wringinlawang, Ds. Jatipasar, Kec. Trowulan, Kab. Mojokerto, Jawa Timur Waktu Pengamatan: Tanggal: 6 April 2017 / 9.32 – 10.56 Receiver: Topcon, Model: Hiper Pro Antena: Topcon Tinggi Antena: Tegak; 1.32 m</p>	
<p>Uraian Lokasi : Berada di tempat terbuka sebelah utara Candi Wringinlawang</p>	
<p>Kenampakan Menonjol : Di taman</p>	
<p>Jalan ke Lokasi : terbuka</p>	
<p>Transportasi & Akomodasi ke Lokasi : Jalan kaki</p>	
Sketsa Umum	Foto Lokasi

Lampiran 5. Dokumentasi

Pengukuran GPS



Pengukuran dengan Total Station *Reflectorless*



Pengambilan foto



Lampiran 6. Hasil Pengukuran GPS dari Topcon Tools



Project Summary

Project name: **06042017.ttp**

Surveyor:

Comment:

Linear unit: **Meters**

Projection: **UTMSouth-Zone_49 : 108E to 114E**

Geoid:

Points

Name	Grid Northing (m)	Grid Easting (m)	Elevation (m)	Code
loggps1_0406c_5T6O	9166112.998	653482.558	71.555	
loggps02_0406c_7RPC	9166100.264	653443.373	71.125	

Lampiran 7. Spesifikasi GPS *Topcon Hiper-Pro*

Physical	
Enclosure	Aluminum extrusion, rainproof
Color	Topcon Yellow
Dimensions	W:159 x H:88 x D:172 mm
Weight	1.74 kg
Antenna	Internal
Battery	Two internal
Controller	External
Mounting	5/8-11
Seals	Silicon (molding in Color)
Keys	Three keys: Power – On/Off Function (FN) – start/st op data logging; switch information mode.

	Reset – receiver hardware reset
LEDs	Four LEDs: STAT – satellite and receiver status REC – record and data status BATT – battery status RX – modem status
Survey Modes	
Base or Rover	Static Kinematic (Stop and Go) RTK (Real-time Kinematic) DGPS (Differential GPS) WASS/EGNOS DGPS
Survey Accuracy	
Static, Fast Static	For L1+L2 – H: 3mm + 0.5ppm (x baseline length); V: 5mm + 0.5ppm (x baseline length)
Kinematic, RTK	For L1+ L2 – H: 10mm + 1.0ppm (x baseline length); V: 15mm + 1.0ppm (x baseline length)
DGPS	<1m
Cold Start	< 60 sec
Warm Start	< 10 sec
Reacquisition	< 1 sec
Tracking Specifications	
Standard Channels	20 channels (G, GG, GD, GGD) L1 GPS, L1/L2 GPS, L1 GLONASS, L1 GPS + L1 GLONASS, WAAS/EGNOS, PCode and Carrier

Tracked Signals	GPS/GLONASS, L1/L2 C/A and P-Code and Carrier, WAAS/EGNOS
Data Features	
Formats	TPS, NMEA, RTCM, BINEX
Features	Up to 20 Hz update rate for real time position and raw data (code and carrier) 10cm code phase and 0.1mm carrier phase precision RTCM SC104 version 2.1, 2.2, 2.3, and 3.0 I/O Multiple Base RTCM Geoid and Magnetic Variation models RAIM Different DATUMs support Output of grid coordinates CMR and CMR+ support
Memory	
Internal Memory	Compact flash card (not removable)
Capacity	Standard – 0 MB Max – 1 GB
Logging Time	53 hours (8 MB, 15sec, L1/L2, 7 satellites)
Logging Interval	0.05 to 86400 seconds, depending on purchased options

Lampiran 8. Spesifikasi *Total Station Hi-Target ZTS-320*



Angle Measurement	
Minimum reading	1"
Precision	2"
Field of view	1°30'
<i>Compensator</i>	
System	Integrated liquid single-axis compensator
Working range	±3'
Setting Accuracy	1"
<i>Distance measurement (IR)</i>	
Ranging with single prism under fine/middling pressure	2000m/2500m
Ranging with reflector	800m
Precision (precise, coarse measurement, tracking)	2 mm±2ppm
Measuring time (single/repeated/tracking)	2.4s/ 1s/ 0.6s

<i>Distance measuring with No-prism</i>	
Ranging with white target plate	350m (for short distance with no prism measurement)
Ranging with single prism	>7500m
Precision (short distance/tracking/prism)	3mm±2ppm
Time for a measurement (short distance / tracking / prism)	2~6 s
Laser Plumb	
Type	Laser point, brightness adjustable in steps
Accuracy	1mm (instrument height: 1.5m)
Operation	
Operating system	RTS
Display	Graphics: 192x96 pixel; Characters: 6 lines x 25 characters; LCD
Keyboard(Optional 2nd keyboard)	Double-sided numeric keyboard
<i>Environment conditions</i>	
Temperature range (operation)	-20°C~+50°C
Temperature range (storage)	-40°C~+70°C
Water proof & dust proof (according to standard IEC60529)	IP54
Weight	
Weight including battery and tribrach	5.5kg
Battery Supply	
Type	High-energy lithium battery
Voltage / capacity	7.4 V; 3000 mAh

Lampiran 9. Peta Kawasan Wisata Candi Wringinlawang

Lampiran 10. Candi Wringinlawang Tampak Depan

Lampiran 11. Candi Wringinlawang Tampak Belakang

Lampiran 12. Candi Wringinlawang Tampak Kanan

Lampiran 13. Candi Wringinlawang Tampak Kiri

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Penulis berasal dari Kota Malang, Jawa Timur. Lahir pada tanggal 1 Januari 1996 dengan nama Selfi Naufatunnisa. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara dari pasangan Nanang Soeprajitno dan Farida Ristiarini. Pendidikan formal yang pernah ditempuh penulis adalah TK Al Hikmah Kota Malang, SDN Lowokwaru III Malang, SMPN 5 Malang, SMAN 4 Malang. Penulis menempuh jenjang S1 Teknik Geomatika ITS melalui Seleksi Bersama Perguruan Tinggi Nasional (SBMPTN) pada tahun 2013.

Di bangku kuliah penulis aktif dalam beberapa kepanitiaan dan organisasi diantaranya volunteer Sosial Masyarakat BEM ITS 2014-2015, Gugur Gunung VII tahun 2014, koordinator pubdekdok Menyentuh Kampus Teknologi (MKT) BEM ITS tahun 2015, ketua departemen sosial HIMAGE-ITS 2015-2016, dan group riset PVIA (*Photogrammetry Visual Image Analysis*). Sejalan dengan akademik, penulis pernah melaksanakan survey Toponimi desa Kecamatan Trawas kabupaten Mojokerto, Kemah kerja – pembuatan peta detail desa Claket Kecamatan Pacet kabupaten Mojokerto, survey hidrografi Pantai Prigi Kabupaten Trenggalek, kerja praktik di Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) serta magang di kantor konsultan PT. Waindo Specterra. Penulis menyelesaikan studi di ITS mengambil Tugas Akhir bidang fotogrametri jarak dekat mengenai Pemodelan 3D Candi Wringinlawang menggunakan Metode *Structure from Motion* untuk Upaya Dokumentasi Cagar Budaya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”